UNIVERSITE DE TOULOUSE

N° d'ordre
78

Année 1947

THÈSES

PRÉSENTÉES A LA

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

PAR

Mohamed HAÏDAR FAÏZI

1re Thèse. - **Contribution à l'étude des Transformateurs fonctionnant sur des capacités.**

2me Thèse. - **Propositions données par la Faculté.**

Soutenues le 26 juillet 1947 devant la Commission d'examen

MM. ESCANDE *Président*
TESSIE-SOLIER
DUPIN *Examinateurs*

TOULOUSE
IMPRIMERIE TOULOUSAINE
(R. LION)
2, RUE ROMIGUIÈRES, 2

1947

CONTRIBUTION A L'ETUDE

des Transformateurs

fonctionnant sur des capacités

UNIVERSITE DE TOULOUSE

FACULTÉ DES SCIENCES

PERSONNEL

Administration :

MM.	DUPOUY	Doyen.
	MIGNONAC	Assesseur.

Honorariat :

MM.	DELTHEIL	Recteur honoraire, Doyen honoraire.
	DOP	Doyen honoraire, Professeur honoraire.
	JACOB	Professeur honoraire.
	DRACH	Professeur honoraire.
	BOUASSE	Professeur honoraire.
	SOURISSEAU	Professeur honoraire.
	CLARENS	Professeur honoraire.
	CAMICHEL	Professeur honoraire, membre de l'Institut.
	MENGAUD	Professeur honoraire.
	BUHL	Professeur honoraire.
	DUFFOUR	Professeur honoraire.

Professeurs :

MM.	ROY	Mécanique ration. et appl. Corresp. de l'Institut.
	DELTHEIL	Calcul différentiel et intégral.
	VANDEL	Zoologie.
	CATHALA	Chimie physique et électrochimie.
	MIGNONAC	Chimie générale.
	DESPAX	Zoologie appliquée et hydrobiologie.
	ESCANDE	Mécanique des fluides.
	JACQUES	Mathématiques générales.
	DUPOUY	Physique.
	PICHOT	Physique.
	GAUSSEN	Botanique.
	CASTÉRAS	Géologie.
	BEDOS	Chimie.
	CHALAUD	Botanique agricole.
	CAPDECOMME	Minéralogie.

Professeurs sans chaire :

NOUVEL	Zoologie.
DUPIN	Electrotechnique.
TEISSIE-SOLIER	Electrotechnique.
GALLAIS	Chimie.

Maîtres de conférences :

MORQUER	Botanique.
RIVALS	Agriculture.

Chargé de cours

PALOQUE	Astronomie.

Chargé de conférences

DURAND	Astronomie.

Secrétariat :

M. DUCROS	Secrétaire

UNIVERSITE DE TOULOUSE

N° d'ordre
78

Année 1947

THÈSES

PRÉSENTÉES A LA

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

POUR OBTENIR

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ

PAR

Mohamed HAÏDAR FAÏZI

1re Thèse. - **Contribution à l'étude des Transformateurs fonctionnant sur des capacités.**

2me Thèse. - **Propositions données par la Faculté.**

Soutenues le 26 juillet 1947 devant la Commission d'examen

MM. ESCANDE — *Président*

TESSIE-SOLIER, DUPIN — *Examinateurs*

TOULOUSE
IMPRIMERIE TOULOUSAINE
(R. LION)
2, RUE ROMIGUIÈRES, 2

1947

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

A SA MAJESTE MOHAMED ZAHIR SHAH

Roi d'Afghanistan.

A S. A. R. LE MARECHAL SHAH WALI KHAN

Commandeur de la Légion d'honneur,
Ministre Plénipotentiaire de Sa Majesté le Roi d'Afghanistan à Paris.

Qui nous a toujours honorés de ses précieux conseils durant nos années d'étude.

A MONSIEUR ISLAM BEG KHAN

Officier de la Légion d'honneur.

ET AUX MEMBRES

DE LA LEGATION ROYALE D'AFGHANISTAN A PARIS

En remerciements de leur bienveillance.

A LA MEMOIRE DE MON PERE ET DE MA MERE

En pieux hommage.

A MON MAITRE MONSIEUR TEISSIE-SOLIER

Professeur à la Faculté des Sciences de Toulouse,
Professeur à l'Institut Electrotechnique de Toulouse.

Hommage de ma profonde reconnaissance.

À MES MAITRES DU LYCÉE ISTEKLAL

À MES AMIS

À TOUS LES MIENS

Avant-Propos

Au moment où nous présentons ce travail, nous tenons à témoigner notre reconnaissance à la France qui nous a généreusement accueillis dans ses divers Etablissements d'Enseignement. Nous avons été heureux d'avoir pu nous abreuver à la source même d'une civilisation humaine, et nous espérons en porter le témoignage vivant dans notre pays déjà attaché à la France par d'étroites relations amicales et culturelles.

Qu'il nous soit permis d'exprimer ici nos vibrants hommages à nos Maîtres des Facultés des Sciences de Toulouse et de Montpellier, qui nous ont toujours honoré de leurs précieux conseils durant nos années d'études.

Nous garderons aussi un souvenir vivant de nos amis français qui nous ont réservé un accueil cordial pendant notre séjour en France.

Introduction

Le fonctionnement des transformateurs sur des capacités se rencontre parfois dans la pratique; ce cas se présente, par exemple lorsque pour améliorer le facteur de puissance en branche, dans un poste d'arrivée, des condensateurs en parallèle sur le réseau. Par ailleurs, lorsque des transformateurs alimentent des lignes haute-tension, la capacité de ces lignes peut entrer en jeu et constituer ainsi d'une façon indirecte le fonctionnement sur des capacités.

Dans la suite de ce travail, nous avons étudié un tel fonctionnement en considérant successivement le cas d'un transformateur alimenté par une tension sinusoïdale, celle du réseau, puis par une tension non sinusoïdale fournie par un alternateur. Nous avons examiné tout d'abord la variation du courant primaire en foncion du courant secondaire, tout en observant à l'oscillographe cathodique les déformations que subit la courbe du courant; ces observations oscillographiques nous ont permis d'expliquer le plus souvent les anomalies constatées dans les mesures au cours de nos expériences.

Par ailleurs, la présence des capacités dans le circuit secondaire d'un transformateur, tout en déformant la courbe du courant, peut provoquer la résonance de certains harmoniques; or, la question des harmoniques qu'engendre un transformateur, en raison de l'allure de la courbe du courant magnétisant et les perturbations que ces harmoniques sont susceptibles de provoquer dans le réseau a été étudiée

par de nombreux auteurs, soit en France, soit à l'étranger (1). Sans entrer dans le détail de ces études, notre but étant surtout de montrer l'influence que peut jouer la capacité des lignes dans le fonctionnement d'un transformateur, nous donnerons un aperçu de quelques-unes d'entre elles.

MM. P. Brancherot et J. Fallou dans un article (1) qu'ils ont consacré à l'étude de la surtension produite par les harmoniques tiennent compte de la capacité des lignes et de la self inductance de l'alternateur qui alimente le transformateur; ils prennent les formules générales sous forme

$$n_1 \Phi + L_1 i_1 + R_1 \int i_1 \, dt = \int v_1 \, dt$$

$$n_2 \Phi + L_2 i_2 + R_2 \int i_2 \, dt = \frac{1}{c} \int \int i_2 \, dt$$

M. E. Hucher (1) examine à l'aide d'un diagramme vectoriel l'influence que la charge active et réactive du réseau exercent sur les harmoniques, la première étant supposé constante, la seconde variable.

M. G. Stein (1) consacre un article à l'étude des harmoniques supérieurs du courant magnétisant dans les transformateurs triphasés : il donne une évaluation mi-théorique, mi-expérimentale de l'amplitude de ces harmoniques en centième de l'onde fondamentale et du courant nominal et en fonction de la saturation du circuit magnétique. Il montre la prépondérance de l'harmonique 5 qui présente un maximum pour une saturation de 13.000 à 15.000 gauss. Il termine son commentaire par des exemples numériques.

Dans notre étude, nous examinons l'influence des harmoniques sur la variation des courants primaire et secondaire; cette influence est surtout prépondérante lorsque la tension d'alimentation n'est pas sinusoïdale. Un autre fait se dégage de l'étude des harmoniques, c'est qu'au moment où la résonance se réalise, les courants correspondants à l'inductance et à la capacité se compensent; il est dès lors possible de déterminer la réactance totale du transformateur et

(1) Cf. la bibliographie.

par suite d'en déduire une méthode permettant d'étudier la chute de tension dans le transformateur. Nous avons essayé de réaliser sur différents tipes de transformateurs la résonnance de certains harmoniques et nous donnons les courbes correspondantes relevées à l'oscillographe cathodique.

Avant d'aborder le détail de notre rédaction, nous nous devons de remercier bien vivement nos Maîtres de la Faculté des Sciences de Toulouse : M. Teissié-Solier, Professeur à l'Institut Electrotechnique, qui a bien voulu se charger de diriger notre travail et nous a accueilli avec bienveillance dans son Laboratoire, pour préparer notre thèse; M. Escande, Directeur, et M. Dupin, Sous-Directeur de l'Institut Electrotechnique, qui nous ont honoré de leurs précieux conseils au cours de nos études et qui ont accepté de faire partie du Jury de notre thèse. Que nos maîtres trouvent ici l'assurance de notre respectueux dévouement.

CHAPITRE PREMIER

Généralités

1° Rappel des lois fondamentales.

Soit un transformateur dont le primaire comportant n_1 spires est alimenté sous une tension v_1 et dont le secondaire comportant n_2 spires débite sur un circuit extérieur quelconque; appelons v_2 la tension secondaire.

Soient au primaire, r_1 la résistance et l_1 le coefficient de self induction partiel correspondant aux fuites; i_1 étant en valeur instantanée le courant primaire; désignons par r_2, l_2 et i_2 les mêmes éléments pour le secondaire.

Nous avons ainsi entre ces éléments et le flux φ commun aux deux enroulements, les relations suivantes :

$$v_1 = r_1 i_1 + n_1 \frac{d\varphi}{dt} + l_1 \frac{di_1}{dt} \qquad (1)$$

$$-v_2 = r_2 i_2 + n_2 \frac{d\varphi}{dt} + l_2 \frac{di_2}{dt} \qquad (2)$$

$$4\pi (n_1 i_1 + n_2 i_2) = \mathcal{R}\varphi \qquad (3)$$

$\mathcal{R}$ étant la réluctance du circuit magnétique.

2° **Diagramme théorique dans le cas où le circuit extérieur est constitué par des capacités.**

Lorsque le secondaire débite sur des capacités le courant I_2 se trouve de $\pi/2$ en avance sur la tension v_2.

D'autre part, la relation (2) devient, en remarquant que $e_2 = -n_2 \frac{d\varphi}{dt}$,

$$e_2 = v_2 + r_2 i_2 + l_2 \frac{di_2}{dt}$$

Partons de la direction OD pour représenter le courant secondaire I_2 (fig. 1) ; à partir du point O portons successivement les vecteurs :

$\overline{OA} = v_2$; décalé de $\pi/2$ en arrière de I_2;

$\overline{AB} = r_2 I_2$; parallèle à OD;

$\overline{BC} = l_2 \omega I_2$; décalé de $\pi/2$ en avant de OD.

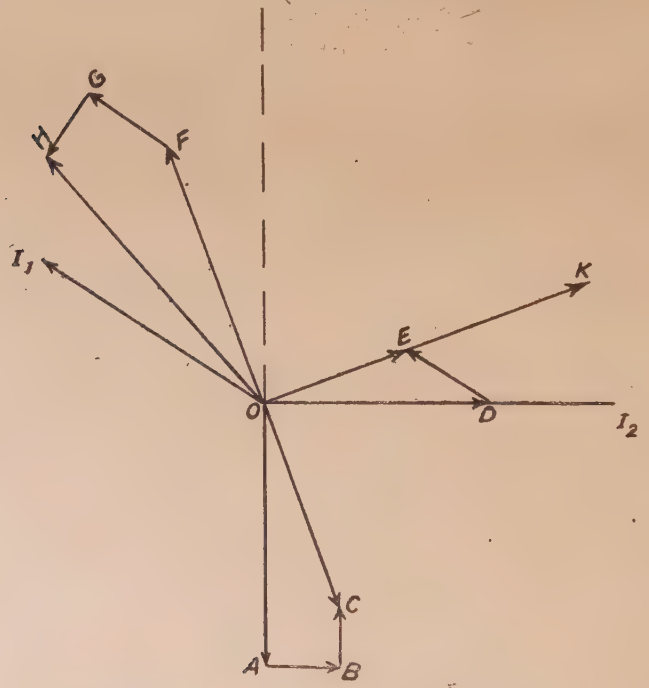


Fig. 1. — Diagramme théorique.

Nous obtenons ainsi en $\overline{OC}$ le vecteur représentant la force électromotrice induite dans le secondaire.

Pour compléter le diagramme, reprenons les relations (1) et (3).

$$v_1 = r_1 i_1 + n_1 \frac{d\varphi}{dt} + l_1 \frac{di_1}{dt}$$

$$n_1 i_1 + n_2 i_2 = \frac{\mathcal{R}\varphi}{4\pi} = n_1 i_0$$

sur $\overline{OK}$, décalé de $\pi/2$ en avant de $\overline{OC}$ et représentant la direction du flux φ portons $OE = n_1 I_0$, puis sur OI_2 un vecteur $\overline{OD} = n_2 I_2$; le vecteur $\overline{DF}$ détermine alors la direction du courant primaire que nous rappelons en OI_1.

L'équation (1) permet de déterminer la direction de la tension primaire; portons, en effet :

En $\overline{OF} = n_1 \omega \Phi$, la valeur de la force électromotrice induite dans le primaire;

En $\overline{FC}$ la chute ohmique $r_1 i_1$ dans l'enroulement primaire;

En $\overline{GH}$ la valeur de la chute inductive $l_1 \omega I_1$, et nous obtiendrons en $\overline{OH}$ le vecteur représentant la valeur de la tension primaire V_1.

Remarque. — Sur la figure 1, les vecteurs $\overline{FG}$ et $\overline{AB}$ représentant les chutes ohmiques primaires et secondaires sont exagérés; en réalité, ces vecteurs, vues les faibles valeurs des résistances r_1 et r_2 sont très petits et peuvent être négligés, de sorte que les points C et H se trouvent sur la vericale de part et d'autre de l'origine O. La tension $V_1 = \overline{OH}$ sera dès lors décalée de $\pi/2$ en avant de I_2 (fig. 2), le flux se trouvant en phase avec I_2.

Théoriquement, le courant à vide dans ce dernier cas doit se trouver en phase avec Φ; mais par suite de l'existence

des pentes à vide et en particulier des pertes magnétiques, I_0 se trouve légèrement en avant de Φ, par suite de I_h.

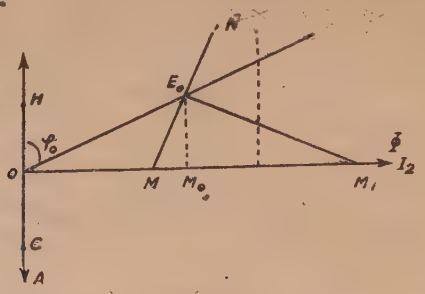


Fig. 2.

3° Etude de la variation du courant primaire.

Nous maintenons constante la tension primaire, et faisons croître le courant secondaire I_2 en augmentant progressivement la capacité insérée au secondaire. Reprenons la relation (3) sous la forme :

$$\overline{I_0} = \overline{\frac{I_2}{k}} + \overline{I_1} \qquad k = \frac{n_1}{n_2} \text{ étant le rapport de transformation.}$$

Nous portons sur la demi-droite OI_2 les différentes valeurs de $\frac{I_2}{k}$ en $\overline{OM}$, $\overline{OM_0}$, $\overline{OM_1}$... nous obtenons en $\overline{ME_0}$, $\overline{M_0E_0}$, $\overline{M_1E_0}$ les valeurs correspondantes du courant primaire, tandis que OE_0 représente le courant à vide I_0. Nous pouvons voir sur le diagramme que le courant primaire décroit à partir du courant à vide $\overline{OE_0} = I_0$ jusqu'à un minimum $\overline{E_0M_0}$, pour lequel le facteur de puissance atteint son maximum, et croît ensuite tandis que le courant secondaire va toujours en croissant. Nous désignerons ce phénomène sous le nom de la *loi du courant*.

4° Détermination graphique du facteur de puissance au primaire.

Dans ce qui va suivre, nous serons amenés assez souvent à calculer à partir des données expérimentales, la valeur du

facteur de puissance pour certains points particuliers. Nous allons dès à présent, indiquer un procédé graphique pour la détermination du facteur de puissance.

Nous supposerons connues, pour un fonctionnement donné du transformateur, les valeurs des courants primaire et secodaire ainsi que le courant à vide; soient I_1, I_2 et I_0 respectivement les valeurs efficaces de ces courants.

Nous portons sur OI_2 une longueur $\overline{OM} = I_2/k$, k étant le rapport de transformation de l'appareil considéré; puis de M comme centre, nous traçons un cercle de rayon I_1; un deuxième cercle de rayon I_0 et de centre O coupera le premier en un point E_0; nous obtenons ainsi en ME_0 la direction du courant primaire. Pour déterminer la valeur de cos. φ il suffit alors de tracer de M comme centre un cercle de rayon 1 qui coupera ME_0 en un point tel que N. L'ordonnée du point N détermine la valeur de cos. φ relative au point M.

5° **Etudes expérimentales sur les courants. Influence de la forme de la courbe de courant sur les mesures.**

Le diagramme théorique nous montre que le courant primaire passe au cours de sa variation par un minimum, lorsque l'on fait croître la valeur de la capacité insérée au secondaire. Nous allons compléter cette remarque par des études expérimentales, en alimentant différents types de transformateurs, soit monophasés, soit triphasés :

1° Par une tension sinusoïdale;
2° Par une tension non sinusoïdale.

Nous verrons alors que, dans les conditions de nos expériences, ce que nous venons d'appeler la loi du courant cesse d'exister lorsque la tension d'alimentation n'est plus sinusoïdale et que, dans le cas d'une tension sinusoïdale, la courbe $I_1(I_2)$ présente une forme analogue à la courbe connue sous le nom de courbe de Mordey et rencontrée dans l'étude du moteur synchrone.

Nous analyserons, pour chaque cas, les anomalies qui se présenteront, soit dans les mesures elles-mêmes, soit dans

la modification de la loi du courant, comme c'est le cas lors d'une alimentation avec une tension non sinusoïdale.

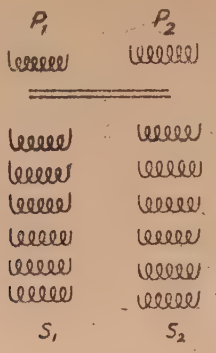


Fig. 3. — Schéma du transformateur Gindre.

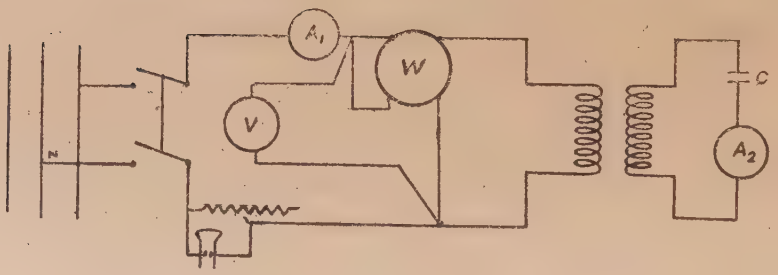


Fig. 4.

Notons que l'oscillographe cathodique, auquel nous avons eu recours continuellement pour observer la forme de la courbe de courant, nous a permis, le plus souvent, d'expliquer la cause de ces anomalies.

CHAPITRE II

Le Transformateur est alimenté par une tension sinusoïdale

A) TRANSFORMATEURS MONOPHASES.

6° Essais sur un transformateur Gindre de puissance apparente égale 2 KVA.

Dans cet appareil de faible puissance (fig. 3), le primaire est constitué par deux bobines chacune de 110 volts, pouvant prendre suivant le cas la disposition série ou parallèle; on peut dès lors attaquer le transformateur directement, soit par la tension simple, soit par la tension composée, sans insérer dans le circuit primaire de rhéostats pour modifier la tension et par suite sans altérer la forme de la courbe de courant observée à l'oscillographe cathodique.

Le secondaire comporte deux groupes de six bobines, chacune de 125 volts, pouvant être combinées de différentes façons, soit en série, soit en parallèle; nous pouvons ainsi par un jeu de montages faire varier la tension au secondaire et par suite le rapport de transformation.

7° Première série d'expériences.

Le primaire est alimenté par la tension simple du réseau; le secondaire débite sur des capacités variables.

Le montage est représenté sur la figure 4 où nous avons placé dans le circuit primaire : d'une part un ampéremètre A_1 donnant la valeur du courant primaire, et un wattmètre W fournissant la valeur de la puissance absorbée par le primaire; d'autre part, l'oscillographe cathodique alimenté par l'intermédiaire d'un shunt. Un ampéremètre A_2 mesure les différentes valeurs du courant secondaire.

Les appareils utilisés sont des étalons.

TABLEAU I

Etude d'un transformateur Gindre n° 2.072, de puissance apparente 2 KVA alimenté par la tension simple du réseau.

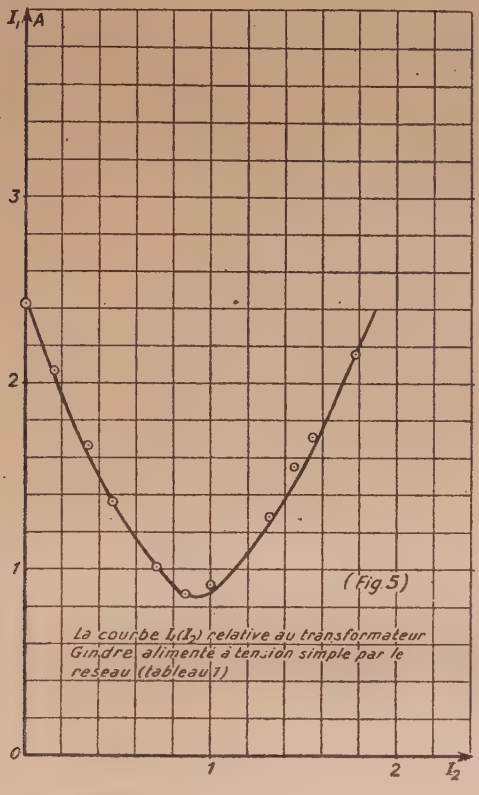
RESULTATS

N° de la mesure	I_1 Ampères	I_2 Ampères	P_1 Watts	V Volts	C Microfarads
1	2,42	0	90	131,5	0
2	2,06	0,15	89	131	1,55
3	1,66	0,34	90	131,5	3,5
4	1,36	0,47	90	131	4,66
5	1,	0,7	91,25	132,5	7
6	0,86	0,86	92,5	133	8,3
7	0,9	1	94	133	10
8	1,27	1,31	96,25	132,5	12,6
9	1,55	1,44	97,5	133,5	14
10	1,7	1,55	102,5	134	16.2
11	2,14	1,77	102,25	135	17,5
12	3,2	2,25	107,5	134	21

A vide : $V_1 = 131^v,5$ $V_2 = 320^v$ $K = \frac{V_1}{V_2} = 0,411$

Le tableau I où nous pouvons lire les valeurs de I_1 et I_2 nous permet de construire la courbe $I_1(I_2)$ (fig. 5). Comme

nous l'avons signalé plus haut (CH I n° 5), cette courbe a bien une forme analogue à une courbe de Mordey. La loi du courant se trouve vérifiée par l'expérience dans le cas qui nous préoccupe : le courant passe, en effet, par un minimum.



(Fig. 5)

La courbe $I_1(I_2)$ relative au transformateur Gindre alimenté à tension simple par le réseau (tableau 1)

En ce qui concerne le facteur de puissance, pour le minimum de courant primaire, nous allons le déduire du tableau I de deux manières différentes :

1° Par un procédé direct en nous servant de la formule classique $\cos \varphi = \frac{P_1}{V_1 \ T_1}$ et nous obtenons 0,808.

2° En construisant le diagramme des courants (fig. 6) déduit de la relation : $\overline{I_1} + \overline{I_2}/k = \overline{I_0}$.

Nous avons dans le cas actuel :

$$\overline{O\,M} = \frac{I_2}{k} = 2{,}01$$

$$\overline{O\,E} = I_0 = 2{,}42$$

Il suffit alors de lire l'ordonnée du point N pour trouver la valeur de Cos. φ = 0,98.

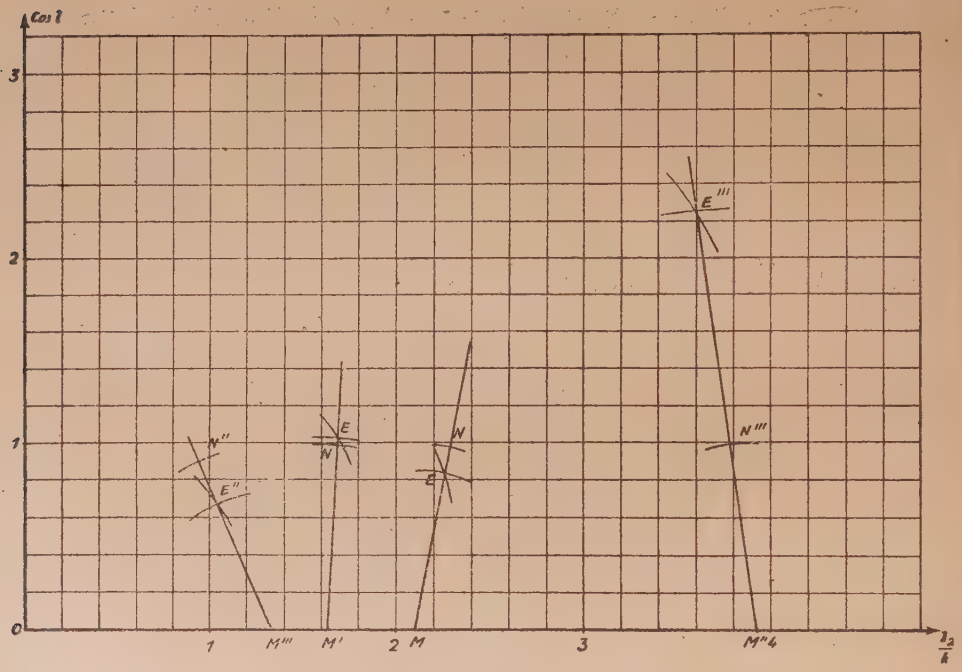


Fig. 6. — Diagramme de cos φ

Nous constatons dès lors une divergence nette entre les deux valeurs de Cos. φ; le facteur de puissance théoriquement égal à I, présente un écart de 20 % dans le premier cas et de 2 % dans le second.

Les observations oscillographiques durant toutes nos expériences nous ont montré que la présence des capacités au secondarie déforme la courbe du courant au primaire. En effet, cette courbe normale à vide, prend des formes très dif-

férentes pour les diverses valeurs des capacités introduites au secondaire.

Nous verrons plus loin, chapitre IV, que pour des valeurs appropriées de la capacité au secondaire, nous pouvons constater l'apparition des différents harmoniques existant dans la courbe de tension; au contraire, la forme de cette dernière n'est pas affectée par la présence des capacités.

M. Abdul Azim a montré dans sa thèse « Sur la mesure des pertes à vide dans les transformateurs » que cette déformation de la courbe du courant introduit des erreurs dans la mesure du courant. Il constate, en effet, par des observations à l'oscillographe Blondel, que pour une valeur de la capacité au secondaire correspondant au minimum du courant primaire, les courbes de courant et de tension se trouvent en phase, donc le facteur de puissance au primaire est égal à l'unité.

Il relève ensuite une photographie de ces courbes puis, à l'aide de ces dernières, il calcule la valeur efficace du courant et de la puissance moyenne en utilisant les relations :

$$I_1 \text{ eff} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i_1^2 \, dt} \qquad P_1 = \frac{1}{T}\int_0^T i_1 \, v_1 \, dt$$

Il vérifie alors que la valeur de P_1 obtenue par ce procédé est en accord avec celle relevée sur le wattmètre lors de l'expérience, tandis qu'il constate une divergence pour le courant. Il en conclut que l'erreur introduite dans le calcul du facteur de puissance à partir de la relation :

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{V_1 \, I_1}$$

provient de l'erreur apportée à la mesure de I_1 par suite de la déformation de la courbe de courant, déformation qui est due à la présence d'harmoniques importants.

De son côté, le procédé du diagramme, où n'entre en jeu qu'un seul élément, le courant, présente un écart de 2 % vis à vis de la méthode théorique; cela peut provenir d'ailleurs du fait que la plus petite valeur du courant relevée sur le tableau I ne correspond pas exactement au minimum de courant sur la courbe.

8° **Essais pour diverses valeurs de la puissance, avec compensation variable du circuit secondaire. Analogie avec les courbes de Mordey.**

Nous remarquons sur le tableau I que la puissance absorbée par l'enroulement primaire reste sensiblement constante au début puis croît légèrement à partir d'une certaine valeur correspondant au minimum du courant.

Nous allons, pour obtenir une série de courbes, modifier la valeur de cette puissance, en faisant débiter le secondaire sur une self et une résistance en parallèle. Nous règlerons le circuit secondaire ainsi constitué sans insérer des capaci-

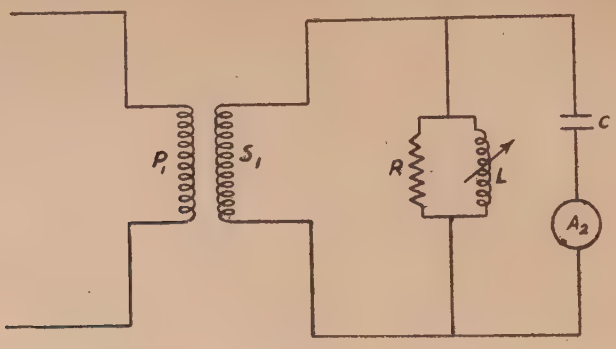


Fig. 7.

tés, de façon à obtenir un facteur de puissance égal à celui correspondant au fonctionnement à vide, mais pour une puissance différente de la puissance à vide. Puis, sans toucher la self et la résistance, nous ferons varier les courants, primaire et secondaire, à l'aide d'une capacité variable que nous placerons en parallèle aux bornes du circuit secondaire. Un ampéremètre A_2 nous donnera les différentes valeurs du courant qui traverse le circuit des capacités; nous désignerons ce courant par I_2.

Le circuit primaire garde la même disposition que sur la figure 4.

Nous désignerons par P'_0 et Cos. φ'_0 les valeurs de la puissance et du facteur de puissance, lorsque la capacité est nulle au secondaire.

1° Nous allons faire trois séries de mesures pour lesquelles les valeurs de la puissance P'_0 sont successivement voisines de 200, 400 et 600 watts, tandis que cos. φ'_0 reste sensiblement constant et voisin de cos. $\varphi_0 = 0{,}28$; φ_0 étant le décalage à vide.

Deuxième série d'expériences.

TABLEAU 2 *Essais, pour des valeurs de P'_0 variables, et cos. φ'_0 sensiblement constant.*

RÉSULTATS

I

N° de la mesure.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1_1 ampères.	5,78	4,45	2,87	2,33	1,98	2	2,42	3,1	3,68	5,2
1_2 ampères.	0	0,66	1,38	1,73	2,11	2,44	2,8	3,22	3,55	4,3
P_1 watts.	215	212	215	218	220	220	220	230	240	252
V_1 volts.	132,5	133	132,5	133	133,5	133	132	133,5	133	133,5
C Microfarads. ..	0	7	14	18	21	25	28	32	35	42

II

1_1 ampère.	10,9	8,05	5,4	4,35	3,75	3,7	4,4	6,45	9,55	
1_2 ampères.	0	1,33	2,68	3,39	4,1	5,1	5,65	6,95	8,55	
P_1 watts.	415	400	400	407	425	435	450	485	525	
V_1 volts.	132	132	132	132,5	133,5	135	135	135	135	
C Microfarads. ..	0	14	28	35	42	49	56	70	84	

III

1_1 ampères.	16,51	14,1	11,5	8	6,16	6,4	8,2	10,4	13,3	15
1_2 ampères.	0	1,3	2,65	5	6,85	7,95	9	10,9	12,5	13,25
P_1 watts.	610	605	610	620	660	695	735	765	825	855
V_1 volts.	128,5	129,5	131	131	133	135,5	136,5	136	135,5	135
C Microfarads. ..	0	14	28	49	70	77	91	105	119	126

(I) $P'_0 = 215$ watts cos $\varphi'_0 = 0{,}282$
(II) $P'_0 = 415$ » cos $\varphi'_0 = 0{,}288$
(III) $P'_0 = 610$ » cos $\varphi'_0 = 0{,}288$

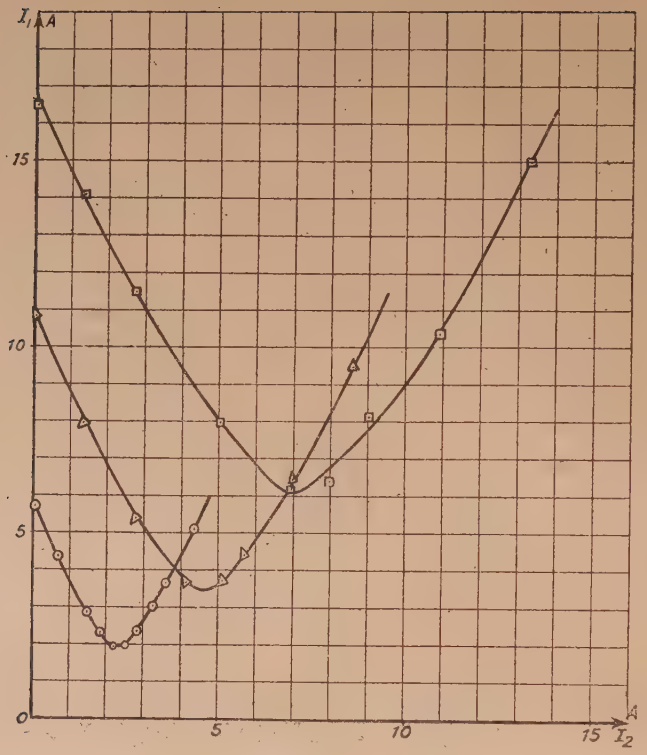


Fig. 8. Courbes I_1 (I_2) relatives au transformateur GINDRE (tableau 2).

□ $P'_0 = 610$ watts $\cos \varphi'_0 = 0{,}288$

Δ $P'_0 = 415$ watts $\cos \varphi'_0 = 0{,}288$ $\cos \varphi_0 = 0{,}28$

O $P'_0 = 215$ watts $\cos \varphi'_0 = 0{,}282$

Nous représentons les courbes $I_1(I_2)$ correspondantes sur la figure 8. Nous obtenons ainsi une série de trois courbes correspondant à 3 puissances différentes, mais à un facteur de puissance qui est sensiblement le même en l'absence de capacités. Nous constatons que ces courbes vont en s'applatissant et que les minimum se déplacent vers le haut et à droite, à mesure que la puissance P'_0 croit. Elles ont la même disposition que les courbes de

Mordey dans le cas du moteur syncrone, lorsqu'à puissance constante on modifie l'excitation.

2° Pour compléter cette analogie, nous allons donner une autre série de mesures où nous faisons croître la puissance P'_0 sans maintenir au facteur de puissance une même valeur en l'absence de capacités.

Troisième série d'expériences.

TABLEAU 3

Essais pour des valeurs variables de P'_0 et cos. φ'_0.

RESULTATS

I

$P'_0 = 315$ watts — $\cos \varphi'_0 = 0{,}435$

N° de la mesure	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1_1 ampères.	5,5	4,15	3	2,5	3,1	4,4	5,8	»	»
1_2 ampères.	0	0,65	1,4	2,05	2,78	3,47	4,22	»	»
P_1 watts.	315	310	320	325	335	342	360	»	»
V_1 volts.	132	132	132,5	132,5	133	132	133,5	»	»
C Microfarads. .	0	7	14	21	28	35	42	»	»

II

$P'_0 = 720$ watts — $\cos \varphi'_0 = 0{,}51$

1_1 ampères.	10,85	8,45	6,5	6,25	6,2	7,2	8,05	10,4	»
1_2 ampères.	0	1,35	2,65	3,38	4,05	5,4	5,92	7,35	»
P_1 watts.	720	720	730	745	755	770	795	840	»
V_1 volts	130	130	129	130,8	131	130	129	131	»
C microfarads. .	0	14	28	35	42	56	63	77	»

III

$P'_0 = 1270$ — $\cos \varphi'_0 = 0{,}58$

1_1 ampères.	17	14,25	12,7	11,7	11,5	11,5	11,9	13,7	15,6
1_2 ampères.	0	2	3,15	4,5	5,2	5,7	7,1	9,2	10,65
P_1 watts.	1270	1300	1300	1333	1350	1375	1425	1475	79
V_1 volts.	126,5	128	128,5	128.5	128,5	129	130	131	131,5
C Microfarads. .	0	21	35	44	56	63	77	99	113

Les courbes $I_1(I_2)$ correspondantes sont représentées sur la figure 9; elles ont la même disposition que dans le cas précédant.

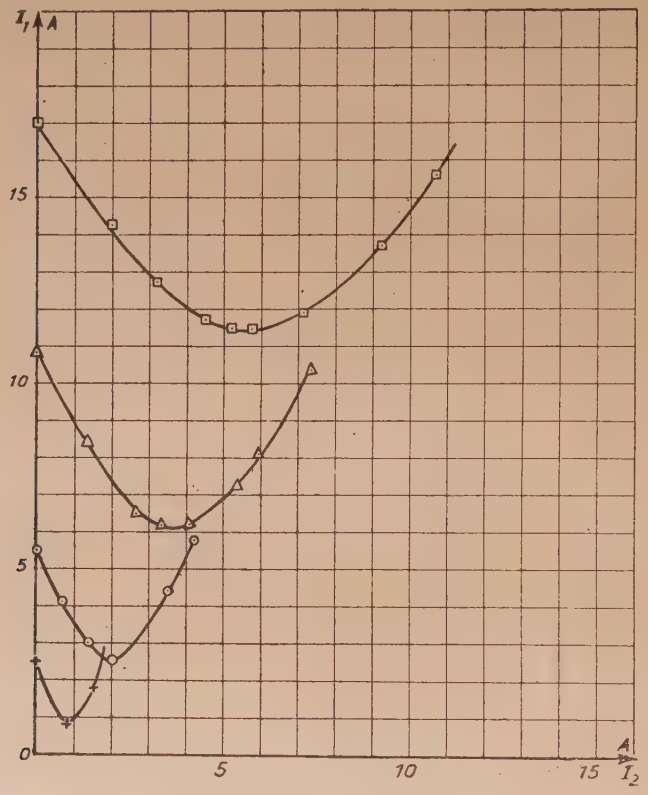


Fig. 9 — I_1 (I_1) relatives au transformateur GINDRE (tableau 3)

⊙ $P'_0 = 315$ watts $\cos \varphi'_0 = 0{,}435$
Δ $P'_0 = 710$ — $\cos \varphi'_0 = 0{,}51$
□ $P'_0 = 1270$ — $\cos \varphi'_0 = 0{,}58$
\+ $P'_0 = P_0 = 90$ watss $\cos \varphi'_0 = \cos \varphi_0 = 0{,}28$ (cf. tab. 1)

9° **Etude complémentaire avec modification du rapport de transformation.**

Pour éviter une tension très élevée au secondaire, nous allons monter en série les bobines du primaire et alimenter

le transformateur par la tension composée du réseau. Nous modifierons le rapport de transformation en couplant de différentes façons les bobines du secondaire.

Quatrième série d'expériences.

TABLEAU 4

Essais sur le même transformateur avec rapport de transformation variable.

RESULTATS

		K = 0,815				K = 0,555				K = 0,412			
N° de la mesure	C Microfarads	I_1 Ampères	I_2 Ampères	P_1 Watts	V_1 Volts	I_1 Ampères	I_2 Ampères	P_1 Ampères	V_1 Volts	I_1 Ampères	I_2 Ampères	P_1 Watts	V_1 Volts
1	0	0,96	0	55	229,2	0,95	0	54	223	0,945	0	54	223
2	1,4	»	»	»	»	»	»	»	»	0,54	0,195	52,6	221
3	1,55	»	»	»	»	0,62	0,19	53	221	4	»	»	»
4	2,33	0,74	0,19	56	230	0,5	0,29	54	222	0,32	0,37	54	221
5	2,8	»	»	»	»	»	»	»	»	0,4	0,455	55	223
6	3,5	»	»	»	»	0,35	0,42	53	221	0,61	0,56	56	224
7	4,66	0,54	0,4	54,6	230	0,38	0,58	55	221	0,85	0,68	58	223
8	5,73	»	»	»	»	0,55	0,75	55,6	222	»	»	»	»
9	7	0,41	0,59	56	230	0,78	0,85	56,6	221	»	»	»	»
10	8,3	0,35	0,76	56,8	230	0,94	0,96	60	225	»	»	»	»
11	9,35	0,335	0,78	58,4	229,2	»	»	»	»	»	»	»	»
12	10	0,345	0,86	58	229	»	»	»	»	»	»	»	»
13	11,45	0,48	0,99	58	230	»	»	»	»	»	»	»	»
14	14	0,68	1,21	58,6	230	»	»	»	»	»	»	»	»
15	17,5	0,9	1,42	60,8	228	»	»	»	»	»	»	»	»

Les courbes relatives à ce tableau sont représentées sur la figure 10.

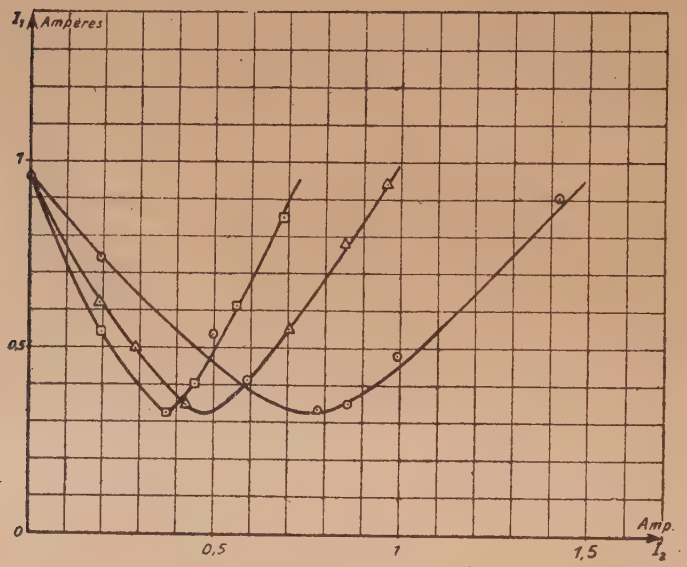


Fig. 10. — Courbes I_1 (I_2), relatives au transformateur GINDRE, au rapport de transformation variable (tableau 4).

⊙ K = 0,815

Δ K = 0,555

□ K = 0,412

1° Elles passent toutes par un même point; le courant à vide, en effet, ne dépend pas du rapport de transformation et reste constant;

2° Leurs minimum se trouvent sur une même horizontale : nous avons, en effet, pour le minimum Im du courant la relation :

$$P_1 = V_1 \, Im \quad \text{ou} \quad Im = \frac{P_1}{V_1}$$

mais la puissance, en négligeant les pertes par effet Joule

(vu la faible valeur des résistances r_1 et r_2) et les pertes dans les condensateurs, d'ailleurs très faibles, pour les petites valeurs de capacités, reste sensiblement constante et égale aux pertes à vide P_0, lesquelles sont indépendantes du rapport k; de son côté v_1, restant constant, il en est de même de I_m

3° Elles vont en s'applatissant à mesure que k croît : Nous avons :

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{K} \text{ ou } I_2 = K I_1$$

pour une même valeur de I_1, I_2 est d'autant plus grand que k est plus grand.

10° **Essais sur un transformateur de puissance apparente = 25 KVA.**

Cet appareil de plus gros calibre que le précédent présente les caractéristiques suivantes :

H. T. : 240 volts, 100 ampères.

B. T. : 200 volts, 124 ampères.

Première série de mesures.

Le transformateur est alimenté du côté H. T. à tension normale par le réseau; la B. T. débite sur des capacités.

TABLEAU 5

Etude d'un transformateur monophasé de 25 KVA alimenté à tension normale par le réseau.

A vide : $V_1 = 238^v$ $V_2 = 187^v$ $K = \frac{V_1}{V_2} = 1{,}272$

RESULTATS

N° de la mesure	I_1 Ampères	I_2 Ampèreo	P_1 Watts	V_1 Volts	C Microfarads
1	1,96	0	190	238	0
2	1,83	0,2	»	»	3,5
3	1,71	0,4	»	»	75
4	1,47	0,84	»	»	14
5	1,29	1,24	»	»	21
6	1,15	1,66	192	»	28
7	1,13	2,07	192,5	»	35
8	1,31	2,87	196	»	49
9	1,51	3,28	199	236,5	56
10	1,77	3,72	202,5	238	63
11	2,02	3,97	209	»	70

Deuxième série de mesures.

Le transformateur est alimenté du côté H. T. à tension réduite par un auto-transformateur lui-même alimenté par le réseau.

TABLEAU 6

Etude du même transformateur alimenté à tension réduite par le réseau.

A vide : $V_1 = 188,5$ volts $V_2 = 150$ volts $K = 1,257$.

N° de la mesure	I_1 Ampères	I_2 Ampères	P_1 Watts	V_1 Volts	C Microfarads
1	1,237	0	125	188,5	0
2	1	0,48	125	190,4	10
3	0,84	1	125	190	21
4	0,75	1,68	132	192,5	35
5	0,86	2,02	132,5	193	42
6	1,09	2,38	135	191	49
7	1,6	3,09	»	190	63
8	2,1	3,75	140	190	70

Troisième série de mesures.

Le transformateur est alimenté en surtension par le réseau du côté B. T.

TABLEAU 7

Le même transformateur alimenté en surtension.

A vide : $V_1 = 234$ volts; $V_2 = 286$ volts; $K = 0{,}818$.

N° de la mesure	I_1 Ampères	I_2 Ampères	P_1 Watts	V_1 Volts	C Microfarads
1	4,52	0	291,5	234	0
2	4,27	0,2	»	»	2,3
3	4,07	0,41	290	»	4,6
4	3,82	0,61	288	»	7
5	3,22	1,29	286,5	»	14
6	2,78	1,92	285	»	21
7	2,48	2,6	»	»	28
8	2,28	3,17	287	233	35
9	2,35	3,5	286,5	233,6	38,5
10	2,45	3,84	289,5	234	42
11	2,81	4,51	249,5	»	49
12	3,31	5,15	300	»	56
13	4	5,86	309,5	»	63
14	4,52	6,42	327,5	233,2	70

Nous représentons les courbes I_1 (I_2) relatives aux trois cas précédents sur la figure 11; on constate que ces courbes ont une forme plus plate que celles relatives au transformateur Gindre.

Dans le cas du Gindre, le courant primaire atteint au cours de sa variation une grande fraction, presque un quart de la charge normale, tandis que dans le cas du transformateur 25 kva, la charge normale étant très grande (de 100

à 124 ampères), le courant primaire atteint au maximum à 4,52 ampères.

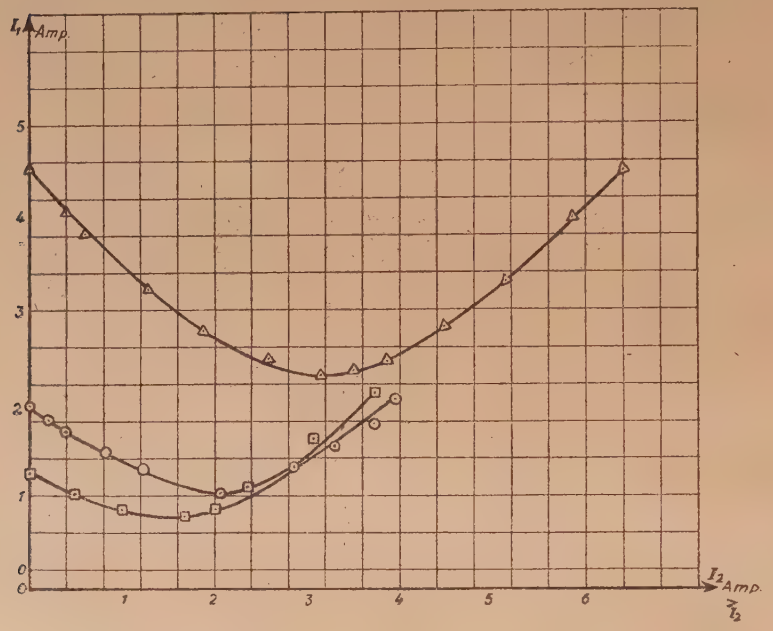


Fig. 11. — Courbes I_1 (I_2) relatives au transformateur monophasé de 25 k. v. a. (tableaux 5, 6, 7) alimenté par le réseau.

⊙ à tension normale (tableau 5).
△ à surtension (tableau 6).
□ à tension réduite (tableau 7).

En ce qui concerne le facteur de puissance relatif au minimum du courant primaire, nous dressons le tableau suivant :

	$\cos\varphi = \frac{P_1}{V_1 I_1}$	$\cos\varphi$ d'après le diagramme	Observations
Tension normale.	0,715	1	l'or. du pt. N′
Tension réduite.	0,91	0,92	» N″
Surtension	0,54	1	» N‴

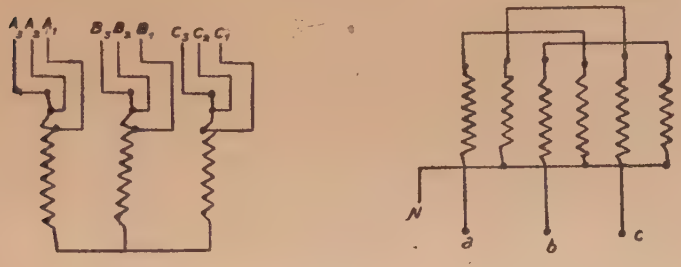
et nous remarquons que la saturation écarte de plus en plus le facteur de puissance de sa valeur théorique.

B) TRANSFORMATEURS TRIPHASES

Nos expériences en triphasé sont faites, sur deux transformateurs haute tension, l'un de puissance apparente 25 kva, l'autre de 7,5 kva. Nous allons tout d'abord donner une description sommaire de chacun de ces appareils.

1° Transformateur triphasé 7,5 KVA.

L'enroulement H. T. en étoile présente trois séries de prises (fig. 12) permettant d'augmenter ou de diminuer de 5 % la tension normale; l'enroulement B. T. est monté en zig-zag.



H. T. Fig. 12. B. T.

H. T.

Voltage normal = 13.000 volts en A_2 B_2 C_2.

Voltage + 5 % = 13.475 volts en A_3 B_3 C_3.

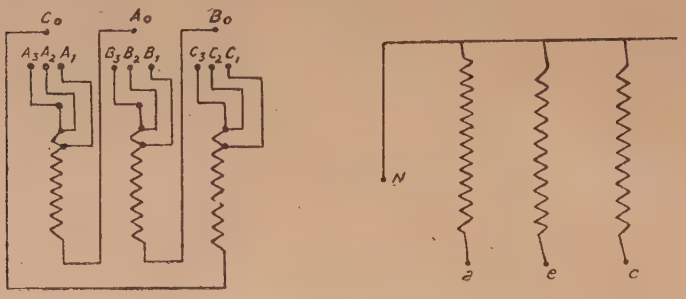
Voltage — 5 % = 12.525 volts en A_1 B_1 C_1.

Cet appareil présente les caractéristiques suivantes :
Puissance continue 7,5 kva;
Puissance intermittente 15 kva;
Tension primaire entre bornes 13.000 volts;
Tension secondaire à vide 234 volts;
Tension secondaire en charge 224 volts.

2° Transformateur 25 KVA.

L'enroulement H. T. en triangle présente comme pour l'appareil précédent trois séries de prises suivant la dispo-

sition de la figure 13; l'enroulement B. T. est monté en étoile.



H. T. B. T.

Fig. 13. — Voltage normal : réunir A_2 C_0 , B_2 A_0, , C_2 B_0.
Voltage + 5 % : réunir A_3 C_0 . . . . . .
Voltage — 5 % : réunir A_1 C_0

Les caractéristiques de cet appareil sont :
Puissance continue : 25 kva;
Tension primaire entre bornes : 13.000 V.
Tension secondaire à vide : 234 volts;
Tension secondaire en charge : 224 volts.

8° **Essais sur le transformateur 7,5 KVA.**

Expériences.

Ces mesures sont faites sur le transformateur 7,5 KVA qui est alimenté du côté H. T. par le transformateur 25 KVA, lui-même alimenté par le réseau du côté B. T. La B. T. du 7,5 KVA jouant le rôle de secondaire, débite sur des capacités. Le montage est représenté sur la figure 14.

Entre le réseau et la B. T. du transformateur 25 KVA, est inséré un disjoncteur qui permet de couper automatiquement le courant en cas d'incident.

Pour mesurer le courant, la tension et la puissance au primaire, nous introduisons des transformateurs de mesures TI_1, TI_3 donnant la valeur du courant sur les phases 1 et 3;

TP_1, TP_3, donnant les tensions entre phases correspondantes.

L'oscillographe cathodique alimenté par l'intermédiaire d'un TI_1 permet l'observation de la courbe du courant.

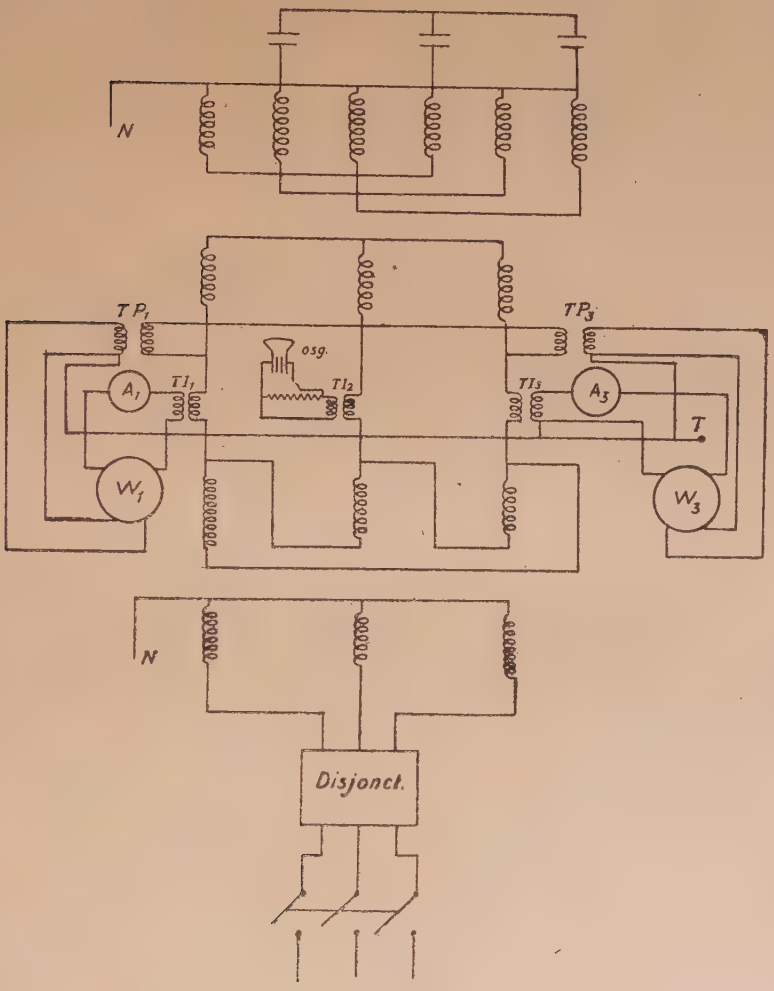


Fig. 14.

TABLEAU 8

Etude d'un transformateur de H. T. d'une puissance apparente de 7,5 KVA.

I_1 : le courant primaire en milliampères est la moyenne des courants mesurés sur les phases 1 et 3;

I_2 : le courant secondaire, en ampères;

U_1 : la tension entre phase au primaire, en volts;

U_2 : la tension entre phase au secondaire, en volts;

C : la capacité par phase au secondaire, en microfarads.

RESULTATS

	I_1 M. A.	I_2 Ampères	P_1 Watts	V_1 Volts	U_2 Volts	C Microfarads
1	29,25	0	174	11820	201	0
2	25,2	0,26	192	11784	200	7
3	20,9	0,45	180	11760	200	14
4	15,1	0,98	180	11856	204	28
5	10,9	1,32	180	12060	206	34
6	8,87	1,63	174	12420	212,6	42
7	7,16	1,94	168	12360	212,6	49
8	13	2,63	90	12000	206	68
9	17,61	2,965	90	12000	206	75
10	21,2	3,19	30	11964	205	82
11	25,62	3,47	42	12000	205	89
12	29,5	3,72	30	12060	207,6	96

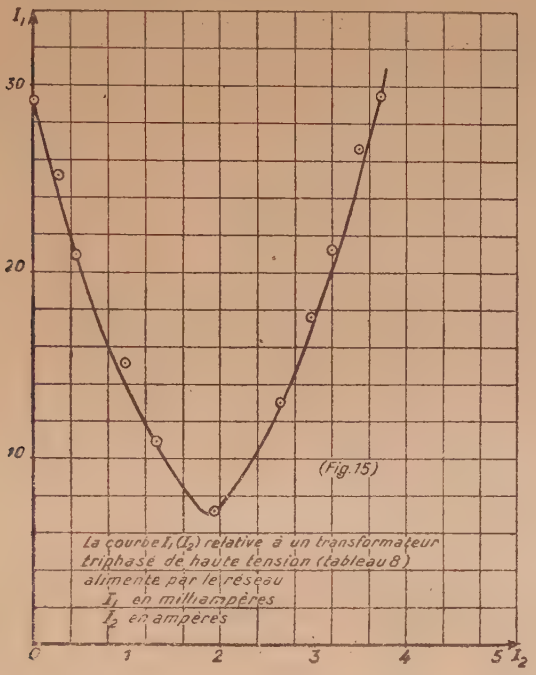
Nous retrouvons ici, comme l'indique la figure 15, la même forme pour la courbe I_1 (I_2) que dans le cas des transformateurs monophasés.

En ce qui concerne le facteur de puissance, relatif au minimum du courant primaire, nous allons le calculer de deux manières différentes :

1° D'après la formule $P_1 = 3\ V_1 I_1 \cos. \varphi_1$ ou :

$$P_1 = \sqrt{3}\ U_1 I_1 \cos. \varphi$$

d'où nous déduisons : $\text{Cos } \varphi_c = \dfrac{P_1}{U_1\ I_1\ \sqrt{3}}$



2° En calculant tg φ d'après la relation :

$$\text{tg } \varphi_{\frac{P_1}{P_3}} = \sqrt{3}\ \frac{P_1 - P_3}{P_1 + P_3}$$

où :

$$P_1 = U_1 I_1 \cos. (-\varphi + 30)$$
$$P_3 = U_1 I_1 \cos. (\varphi + 30)$$

sont les valeurs de la puissance mesurée par la méthode de deux wattmètres sur les phases 1 et 3; de cette façon, le facteur de puissance ne dépend que des indications d'un seul appareil.

Les wattmètres nous ont donné pour le minimum les valeurs suivantes : $P_1 = 84$ watts — $P_2 = 84$ watts.

Nous en déduisons pour ce point : $\text{Cos } \varphi_c = 1,1$

$$\text{Cos } \varphi \frac{P_1}{P_2} = 1$$

Le calcul de Cos. φ par le premier procédé introduit un excès de 10 % ; les causes en sont nombreuses; aux erreurs introduites par la déformation de la courbe de courant, s'ajoutent d'autres, provenant des transformateurs de mesure. M. Azim a vérifié dans sa thèse « Sur la mesure des pertes à vide dans les transformateurs » que les mesures fournissent des valeurs différentes pour la puissance et le courant suivant que l'on utilise ou non des transformateurs de mesure.

Le second procédé de calcul où n'intervient que les valeurs de la puissance seule n'introduit qu'une erreur négligeable.

CHAPITRE III

Etude de la chute de tension en utilisant la résonance des harmoniques

Nous venons de voir, au cours de nos expériences, que la présence de capacités dans le circuit secondaire d'un transformateur déforme la courbe de courant dans le circuit primaire. Ces observations nous ont amené à étudier le phénomène de résonance et à chercher à obtenir les différents harmoniques du courant. Il semble alors possible de déterminer la réactance totale du transformateur en vue d'étudier la chute de tension.

12° Etude des harmoniques. Phénomène de résonance.

Nous savons que la rotation d'un circuit dans un champ magnétique engendre des forces électromotrices et, par suite, des courants périodiques alternatifs. Dans la pratique, on représente ces quantités alternatives par une simple fonction sinusoïdale; en réalité, elles sont constituées par la somme d'une série de termes sinusoïdaux, tous périodiques, et, on peut, dès lors, quelle que soit la forme de ces courbes, représenter leur équation, en toute rigueur, par un dévelop-

pement en série de Fourier. Soit i, la valeur instantanée du courant, on a :

$$i = \sum_{j=1}^{j=n} Aj \ \mathrm{Sin} \left(\frac{2\pi t}{T_j} + \varphi j \right)$$

ou en mettant en évidence la pulsation :

$$i = \sum_{j=1}^{j=n} Aj \ \mathrm{Sin} \ (j\omega t + \varphi j)$$

Dans ces équations, le premier terme (j = 1), de période T et de pulsation ω est appelé fondamental ou encore harmonique 1, les autres de période T/j et de pulsation $j\omega$ avec j = 2, 3... n, sont des harmoniques d'ordre 2, 3... n.

L'amplitude de l'harmnoique n est dès lors exprimée par la relation :

$$I_n = \frac{V}{\sqrt{R^2 + \left(n L \omega - \frac{1}{n c \omega} \right)^2}}$$

et le décaloge φ_n entrs la tension V et le courant I_n étant :

$$\mathrm{tg} \ \varphi_n = \frac{n L \omega - \frac{1}{n c \omega}}{R}$$

On voit que la résonance sera réalisée si l'on a :

$$n L \omega = \frac{1}{n c \omega}$$

ou : $n^2 LC\omega^2 = 1$, puisqu'alors la pulsation propre :

$$\frac{1}{\sqrt{LC}} = n \omega$$

du circuit devient égale à celle de l'harmonique correspondant.

13° Harmoniques engendrés par un transformateur.

Lorsqu'on alimente un transformateur ordinaire à circuit magnétique fermé en fer, le courant magnétisant absorbé par le transformateur subit une distorsion notable : cette propriété est la conséquence directe de la forme du cycle d'hystérésis. L'expérience et la théorie montrent que sous

l'effet de la saturation et de l'hystérésis, la courbe de courant contient des harmoniques de rang impair dont l'amplitude va en décroissant à meure que leur fréquence augmente. Les plus importants par leur amplitude sont les harmoniques 3 et 5. M. K. KUEHN (1) constate la composition suivante pour les harmoniques du courant magnétisant :

HARMONIQUES	EN % DU COURANT MAGNÉTISANT	EN % DU COURANT NOMINAL
3	2 à 6	0,04 à 0,13
5	12 à 20	0,3 à 0,5
7	2 à 4	0,04 à 0,12
9	0,2 à 0,7	0,006 à 0,02
11	0,4 à 0,7	0,008 à 0,03

L'harmonique 5, qui prédomine de loin atteint déjà une valeur très élevée. L'harmonique 13 et ceux de rang supérieur peuvent être pratiquement négligés.

Les valeurs relatives des harmoniques qui se manifestent dans le courant, dépendent de la puissance du transformateur, du type du circuit magnetique, des connexions des enroulements et de la valeur de l'induction dans le circuit magnétique : Pour une alimentation triphasée symétrique, l'harmonique 3 ne peut exister, car il a le même décalage dans les trois phases; il peut par contre se produire lorsque le transformateur possède un enroulement en triangle ou que le réseau possède un fil neutre.

Ces harmoniques se trouvent amplifiés lors du fonctionnement sur une charge capacitive élevée, cas par exemple d'une ligne fonctionnant à vide ou faiblement chargée.

Dans les conditions de la pratique, selon M. KUEHN, l'harmonique 5 peut être amplifié 1,5 fois et même dans des cas particulièrement défavorables 2,5 fois. Les conditions sont plus défavorables au moment de la résonance où la fréquence de l'harmonique coïncide à la fréquence propre du réseau et l'amplitude atteint son maximum.

(1) M. K. KUEHN, professeur dipl. Ing. de la A. G. Sächsiche Werke. Dresde (Allemagne). Cf. la bibliographie.

Lorsque les réseaux à moyenne tension comportent de longs tronçons de câble, la fréquence pour laquelle la résonance peut se produire est comprise entre les harmoniques 5 et 7 et entre les harmoniques 5 et 3. Par conséquent, pour des couplages déterminés, il peut très bien arriver que la résonance intervienne justement pour l'harmonique 5. Dans ce cas, l'harmonique 5 peut devenir de 2,5 à 8 fois plus grand. Ce cas de résonance se rencontre toutefois rarement dans la pratique.

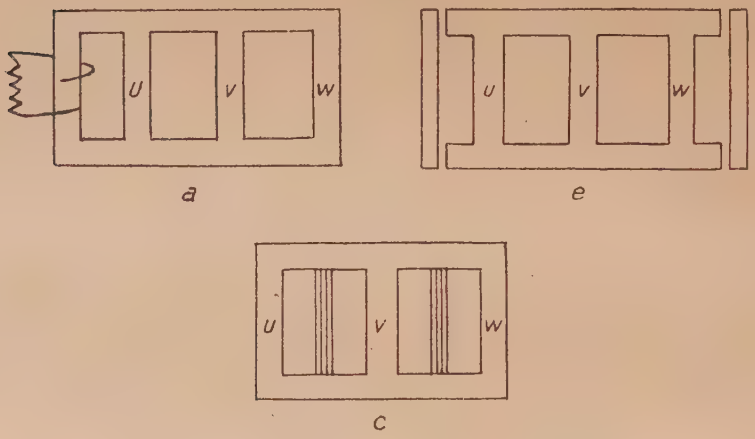


Fig. 16. — Réalisation du noyau HUETER.

Les intensités de courant des harmoniques produisent une chute de tension additionnelle, laquelle tend à déformer la tension aux extrémités de la ligne; elles conduisent d'autre part à un accroissement de la charge des alternateurs et à un dérangement des bobines de mise à la terre et des relais ainsi qu'à de notables perturbations dans les réseaux de télécommunications.

La question de compensation des harmoniques a attiré l'attention de plusieurs auteurs : Ce sont HUETER et BUCH qui ont indiqué les premiers une méthode simple pour obtenir une compensation convenable de l'harmonique 5 dans les transformateurs. Elle consiste à utiliser le rapport cu-

rieux qui existe entre les harmoniques 3 et 5 dans le courant magnétisant. M. KRAEMER (1) a donné une analyse de la méthode de HUETER-BUCH. Notons simplement qu'il est possible, selon HUETER et BUCH d'influencer l'amplitude de l'harmonique 5 par une résistance magnétique appropriée (fig. 16) d'un noyau additionnel à retour de flux. Les noyaux

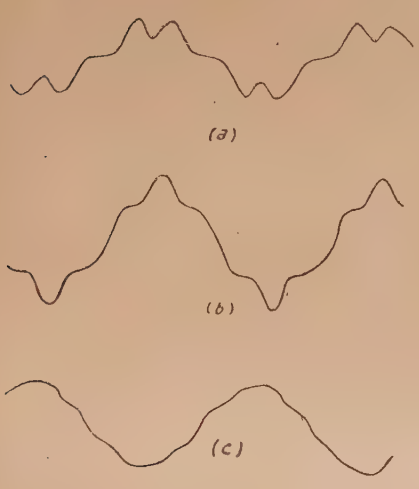


Fig. 17.

Fig. 18.

Fig. 17. — Courant de magnétisation d'un transformateur ayant une symétrie magnétique avec retour du flux magnétique.
a résistance magnétique du noyaux à retour du flux $\longrightarrow 0$
b résistance magnétique du noyaux à retour du flux $\longrightarrow \infty$
c résistance magnétique du noyaux à retour du flux dimensionné suivant Hueter

Fig. 18. — Courant de magnétisation d'un transformateur de 100 k. v. a. avec induction anormalement élevée (B = 16.200 g).
a construction normale.
b avec compensation suivant Hueter et Buch.

additionnels dont la section n'est qu'une fraction de celle du noyau principal peuvent être disposés comme sur la figure 16.

Nous pouvons constater sur les figures 17 et 18 les trans-

(1) W. KRAEMER, Docteur-Ing. Berlin. Cf. bibliographie.

formations que subit la courbe du courant magnétisant pour différentes valeurs de la résistance magnétique et l'amélioration que peut apporter l'effet de HUETER dans l'amplitude de l'harmonique 5. Ces courbes ont té relevées par M. KRAEMER.

Au cours de nos expériences, nous avons souvent rencontré des formes de courbes de courant analogues. Lorsque nous faisons varier la capacité disposée sur le secondaire du transformateur, nous constatons, à partir d'une certaine valeur de celle-ci, qui dépend d'ailleurs du transformateur utilisé, l'apparition de l'harmonique 5 sur la courbe du courant primaire. Cet harmonique persiste pour un transformateur donné pour des valeurs de la capacité variant dans d'assez larges limites, cependant, la forme de la courbe et l'amplitude de l'harmonique varient entre ces limites.

Suivant le transformateur utilisé et la valeur de la capacité, cet harmonique peut présenter, au cours de sa variation, l'une des formes indiquées sur les figures 17 et 18. L'examen de ces figures permet d'admettre qu'il existe une certaine analogie entre l'influence de la résistance magnétique du noyau Hueter et celle de la capacité insérée au secondaire. Cependant, pour une valeur déterminée C_0 de la capacité, la résonance de l'harmonique 5 se produit. L'effet de la capacité se trouve de plus en plus atténué à mesure que l'on s'éloigne de la valeur C_0, l'amplitude de l'harmonique 5 diminue progressivement et la courbe de courant prend l'une des formes 17c ou 18b.

Par suite, l'on peut dire que la capacité disposée au secondaire joue un rôle analogue à celui d'une résistance magnétique; la valeur qui provoque la résonance de l'harmonique 5 correspondant à une résistance magnétique nulle.

14° Application du phénomène de résonance au transformateur.

Lorsqu'on fait débiter le secondaire d'un transformateur sur des condensateurs, on constitue un circuit comprenant une résistance, une self et une capacité qui sera parcouru

par un courant développable en série de Fourier. Pour des valeurs appropriées de capacité, on pourra alors obtenir les différents harmoniques du courant primaire et l'harmonique d'ordre n sera obtenu pour une valeur de :

$$C_2^n = \frac{I}{n^2 L \omega^2}$$

C_2^n représente la valeur de capacité insérée au secondaire et L le coefficient de self induction de l'ensemble du transformateur rapporté au secondaire.

On a donc : $L = \left(l_2 + \frac{l_1}{k^2} \right)$

k étant le rapport de transformation.

15° Etude de la chute de tension.

Reprenons les relations fondamentales :

$$+ v_1 = r_1 i_1 + n_1 \frac{d\varphi}{dt} + l_1 \frac{di_1}{dt}$$

$$- v_2 = r_2 i_2 + n_2 \frac{d\varphi}{dt} + l_2 \frac{di_2}{dt}$$

$$n_1 i_1 + n_2 i_2 = 0$$

où nous négligeons le terme $\mathcal{R}\varphi$.

Ajoutons membre à membre les deux premières équations après avoir multiplié la seconde par — 1/k et remplacé i par — i_2/k. Nous obtenons :

$$- \frac{v_1}{k} = v_2 + \left(\frac{r_1}{k^2} + r_2 \right) i_2 + \left(\frac{l_1}{k^2} + l_2 \right) \frac{di_2}{dt}$$

Cette équation peut s'interpréter par un diagramme.

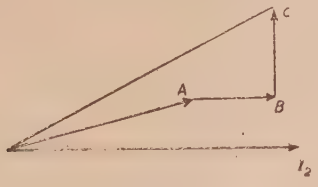


Fig. 19.

Partons, en effet, de la direction $\overrightarrow{OI_2}$, représentant le courant secondaire comme origine (fig. 19) et portons à partir de O les vecteurs :

$$\overline{OA} = V_2$$

$$\overline{AB} = \left(\frac{r_1}{k^2} + r_2\right) I_2$$

$$\overline{BC} = \left(\frac{l_1}{k^2} + l_2\right) I_2 \omega = L\omega I_2$$

Nous obtenons ainsi en $\overline{OC}$ la valeur de $\frac{-V_1}{k}$. Tous les éléments du diagramme sont connus, sauf le vecteur BC qui exige la détermination de $L\omega$. Mais, nous pouvons obtenir ce dernier par la méthode de résonance : il suffit, en effet, de déterminer un harmonique déterminé, d'ordre j par exemple, et en déduire :

$$L\omega = \frac{1}{C_2^j \times \omega \times j^2}$$

C_2^j étant la valeur de la capacité, insérée au secondaire, qui permet d'obtenir l'harmonique d'ordre j.

VERIFICATION DES LOIS DE RESONANCE APPLIQUEES AUX TRANSFORMATEURS COMPARAISON AVEC LA METHODE DE KAPP

Nous venons de voir qu'il semble possible de déterminer la réactance totale d'un transformateur en appliquant à ce dernier les lois de résonance. Nous allons, en vue de vérification, appliquer ce procédé à quelques transformateurs et comparer la valeur de $L\omega$ ainsi obtenue avec celle qu'on obtiendrait par la méthode de Kapp.

16° Application au transformateur Gindre.

Le montage restant le même que sur la figure 4, les deux bobines primaires en série sont alimentées par la tension composée du réseau. En maintenant constante la tension

primaire, nous faisons graduellement croître la valeur de la capacité au secondaire tout en observant pour chaque valeur de celle-ci la forme de la courbe de courant à l'oscillographe cathodique placé comme l'indique la figure 4 sur le circuit primaire.

Nous constatons ainsi l'apparition de l'harmonique 23 pour une valeur de capacité au secondaire égale à 3,5 microfarads et que nous désignons par

$$C_2^{23} = 3{,}5\ \mu f$$

La capacité donnant l'harmonique d'ordre n sera dès lors de la forme :

$$C_2^n = \frac{1}{n^2\ L\omega^2}$$

Nous déduisons de ces deux relations :

$$C_2^n = \frac{(23)^2}{n^2}\ C_2^{23}$$

Ce qui permet de calculer les capacités relatives aux autres harmoniques à partir de C_2^{23}.

En vue de vérifications, nous avons cherché les harmoniques d'ordre 19, 17, 11 et 5 (fig. 20) que nous avons obtenus à l'oscillographe cathodique, pour des valeurs de la capacité au secondaire successivement égales à :

4,6 5,95 14 et 70 microfarads.

Le calcul nous donne par ailleurs :

$C_2^{19} = 4{,}75\ \mu f$; $C_2^{17} = 5{,}95\ \mu f$; $C_2^{11} = 14{,}1\ \mu f$; $C_2^{5} = 68{,}5\ \mu f$.

Remarque :

Les observations oscillographiques nous ont montré que, pour les harmoniques d'ordre élevé tels que 23, 19, 17, la valeur de la capacité reste très restreinte et serrée autour d'une valeur précise. Pour l'harmonique d'ordre 5, cette valeur est assez élastique; nous obtenons, en effet, cet harmonique pour une valeur de C_2^5 allant de 66 à 81 microfarads. De son côté, l'harmonique 11 peut s'obtenir pour une valeur de C_2^{11} un peu au-dessus de 14 jusqu'à 16 microfarads.

Mais la forme des courbes donnant ces harmoniques, présentant plus de symétrie et de netteté pour des valeurs de C voisines de la valeur précise donnée par le calcul (fig. 20 *b*).

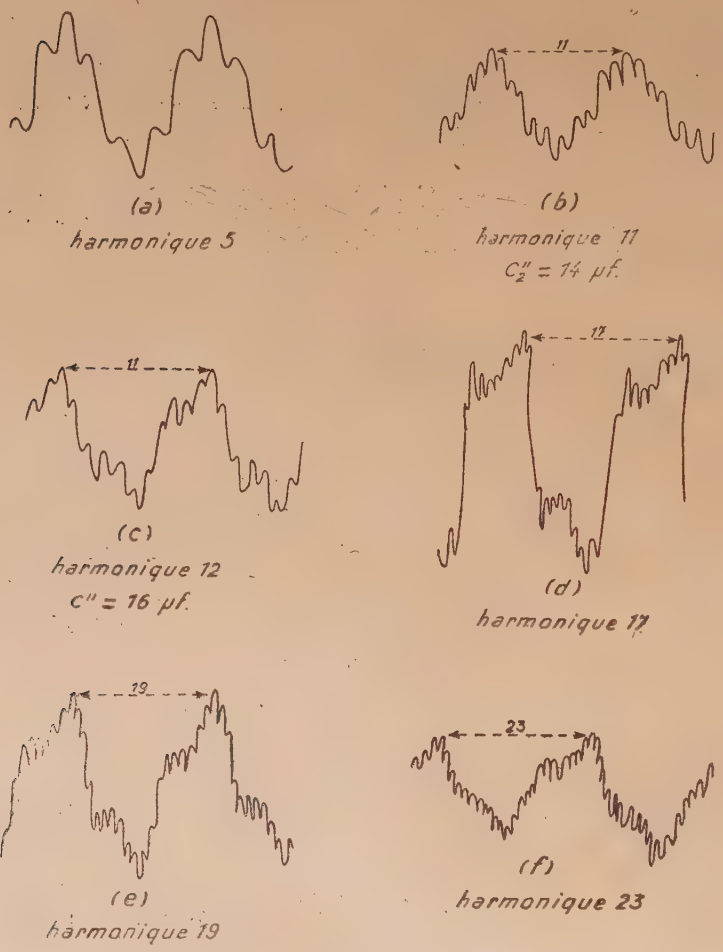


Fig. 20. — Harmoniques relatifs au transfo Gindre.

Il est dès lors préférable de prendre pour base un harmonique d'ordre aussi élevé que possible et d'en déduire la capacité nécessaire à l'apparition d'autres harmoniques d'ordre inférieur.

17° Détermination de la réactance. Comparaison avec la méthode de Kapp.

Les considérations précédentes nous permettent de calculer la réactance totale du transformateur, à partir d'un des harmoniques que nous venons de déterminer. Nous avons, en effet, en partant de l'harmonique 23 :

$$L\omega = \frac{10^6}{(23)^2 \times 3,2 \times \omega}$$

Dans le cas étudié, où $\omega = 314$, il vient :

$$L\omega = \frac{10^2}{(2,3)^2 \times 3,2 \times 3,14}$$

$$= \frac{1}{0,54} = 1,85 \text{ homs}$$

Nous allons à présent déterminer la valeur de $L\omega$ par la méthode de Kapp, c'est-à-dire en court-circuitant le secondaire du transformateur, après avoir abaissé la tension primaire à l'aide d'une self de façon à avoir au secondaire un courant égal au courant normal. Nous obtenons ainsi les valeurs suivantes :

$I_{1cc} = 8,19$ Ampères $\qquad V_{1cc} = 13,9$ volts

$I_{2cc} = 6,8$ —

D'ailleurs l'équation :

$$-\frac{V_{1cc}}{k} = \left(\frac{r_1}{k^2} + r_2\right) i_2 + \left(\frac{l_1}{k^2} + l_2\right) \frac{di_2}{dt}$$

qui représente le triangle de Kapp nous donne :

$$L\omega = \sqrt{\left(\frac{V_{1cc}}{k\, I_{2cc}}\right)^2 - \left(\frac{r_1}{k^2} + r_2\right)^2}$$

Cette dernière relation nous permet de calculer la valeur de $L\omega$ à condition toutefois de connaître les valeurs des résistances primaire et secondaire.

Nous avons mesuré ces valeurs au Pont de Wheastone et nous avons obtenu :

$r_1 = 0{,}47$ ohms; $r_2 = 1{,}017$ ohms.

En portant ces valeurs et celles des courants et de la tension dans la relation précédente, nous obtenons :

$$L\omega = 1{,}84 \text{ ohms.}$$

On retrouve très sensiblement la même valeur que dans le cas de la résonance.

18° Application à deux transformateurs haute-tension montés en cascades.

Nous reprenons ici les deux transformateurs triphasés de puissance apparentes respectivement égales à 25 KVA et 7,5 KVA que nous avons précédemment décrits. Nous alimentons le transformateur 7,5 KVA du côté H. T. par le transformateur triphasé 25 KVA, lui-même alimenté par le réseau du côté B. T. La B. T. du transformateur 7,5 KVA jouant le rôle de secondaire débite sur des capacités variables. En opérant de la même façon que pour le transformateur Gindre, nous avons pu observer à l'oscillographe cathodique, placé sur le circuit primaire (fig. 14) la résonance de l'harmonique 19 pour une valeur de la capacité par phase = 32 microfarads.

Partant de cette valeur comme base, nous pouvons dès lors calculer les valeurs des capacités à mettre au secondaire pour obtenir la résonance des autres harmoniques. Les harmoniques d'ordre supérieur à 19, que nous avons pu observer à l'oscillographe, pour des valeurs de la capacité vérifiant la relation :

$$C_n = \frac{(19)^2}{n^2} \times 32 \quad \text{microfarads pour } n > 19$$

n'ont pas pu être photographiés.

Nous donnons par contre figure 21, la reproduction des clichés des harmoniques 19, 13, 11 et 5 que nous avons pu photographier. L'harmonique 5 s'obtient ici comme dans le cas du Gindre pour une valeur assez élastique de la capacité. Nous reportons ici deux figures représentant l'harmonique 5,

la première (fig. 21 *a*) obtenue pour une valeur de $C_2^5 = 475$ microfarads, la seconde (fig. 21 *b*) pour $C_2^5 = 396$ microfarads. Le calcul nous conduit à une valeur :

$$C_2^5 = \left(\frac{19}{25}\right)^3 \times 32 = 475 \text{ microfarads.}$$

Quant aux harmoniques 13 et 11, nous les avons obtenus pour des valeurs de la capacité successivement égales à 69 et 96 microfarads. Ces valeurs sont vérifiées par le calcul, nous avons, en effet :

$$C_2^{13} = \left(\frac{19}{13}\right)^2 \times 32 = 68{,}5 \ \mu\text{f.}$$

$$C_2^{11} = \left(\frac{19}{11}\right)^2 \times 32 = 95{,}5 \ —$$

Nous allons à présent déterminer la valeur de la réactance totale, $L'\omega$, de l'ensemble des deux transformateurs :

En considérant la résonance de l'un des harmoniques, celle de 19 par exemple, nous pouvons déterminer la valeur de $L'\omega$ correspondant à une phase, on obtient ainsi :

$$L'\omega = \frac{10^6}{(19)^2 \times 32 \times \omega}$$

Cette relation nous donne pour $\omega = 314$:

$$L'\omega = 0{,}272 \text{ ohms.}$$

19° **Détermination de $L'\omega$ par la méthode de Kapp. Comparaison avec la méthode de résonance.**

L'application de la méthode de résonance nous conduit en considérant les mesures précédentes à la valeur :

$$L'\omega = 0{,}272 \text{ ohms.}$$

D'autre part, en appliquant la méthode de Kapp séparément à chacun des deux transformateurs, nous obtenons la réactance totale de cet appareil à partir de la relation :

$$L\omega = \sqrt{\left(\frac{V_{1cc}}{I_{2cc}}\right)^2 - \left(\frac{r_1}{k^2} + r_2\right)^2}$$

Le secondaire étant en court-circuit, nous avons mesuré

la valeur du courant au primaire; la relation précédente devient dès lors en remplaçant I_2 par kI_1 :

$$L\omega = \frac{1}{k^2}\sqrt{\left(\frac{V_{1cc}}{I_{1cc}}\right)^2 - \left(r_1 + k^2 r_2\right)^2}$$

où v, I_1, r_1 et r_2 sont des éléments par phase.

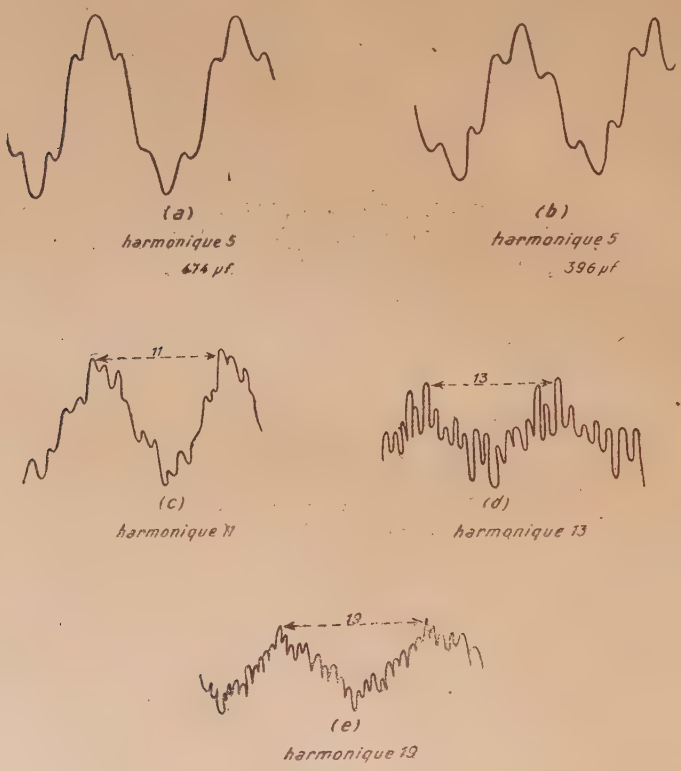


Fig. 21. — Harmoniques relatifs aux transformateurs triphasés de (7,5 — 25) k. v. a. montés en cascade.

Dans le cas du transformateur 7,5 KVA nous avons réalisé le court-circuit dans les conditions suivantes :

$$V_{1cc} = \frac{228}{\sqrt{3}} \text{ volts} \quad I_{1cc} = 0{,}148 \text{ ampères} \quad k = 56{,}2$$

Quant aux valeurs des résistances, nous les avons mesurées de deux manières différentes, à savoir au Pont de Wheatstone et par la méthode de l'ampéremètre et du voltmètre; nous donnons ici les valeurs moyennes :

$$r_1 = 298{,}5 \text{ ohms}; \quad r_2 = 0{,}0723 \text{ ohms.}$$

Les valeurs ainsi trouvées, portées dans la relation précédente nous donnent :

$$L\omega_{7,5} = 0{,}226$$

En ce qui concerne le transformateur 25 KVA, le court-circuit est réalisé dans les conditions suivantes :

$$V_{1cc} = \frac{447}{\sqrt{3}} \text{ volts.}$$

$$I_{1cc} = 0{,}99 \text{ ampères.}$$

On a : $L\omega = \sqrt{\left(\frac{V_{1cc}}{I_{1cc}}\right)^2 - (r_1 + k^2 r_2)^2}$

Il suffit alors, pour déterminer la valeur de $L\omega$, de connaître celles des résistances par phase, r_1 et r_2 des enroulements primaire et secondaire.

Nous avons :

$$r_1 = 93{,}45 \text{ ohms}; \quad r_2 = 0{,}02 \text{ ohms.}$$

d'où $L\omega_{25} = 0{,}065$ hame.

Des déterminations précédentes, nous déduisons la valeur $L'\omega$ de la réactance totale des deux transformateurs montés en cascade, soit :

$$L'\omega = 0{,}226 + 0{,}065 = 0{,}291 \text{ ohms.}$$

On retrouve avec une approximation très satisfaisante une valeur très voisine de celle obtenue dans le cas de la résonance.

20° Application au transformateur monophasé de 25 KVA.

Sur ce transformateur, nous n'avons pu observer rien d'intéressant; nous avons fait varier la valeur de la capacité dans de larges limites : de 0 à 300 microfarads environ, sans

arriver à obtenir un harmonique déterminé sur l'écran de l'oscillographe.

Nous pouvons constater, d'après ces observations, que la résonance des harmoniques sur la courbe du courant primaire d'un transformateur dépend de la puissance de ce transformateur. La résonance se réalise facilement sur les appareils de faible puissance, mais lorsque la puissance dépasse une certaine valeur d'ailleurs assez faible, aucune résonance ne peut être obtenue nettement; ceci s'explique par ailleurs de la façon suivante :

Dans les appareils de faible puissance, le coefficient de self-induction est assez grand pour pouvoir vérifier la relation $LCn^2\omega^2 = 1$ tandis que, dans les appareils de puissance élevée, la valeur de self est très faible et on ne parvient pas à réaliser la relation fondamentale de résonance : c'est ainsi que nous avons pu réaliser sur le Gindre et le transformateur triphasé de Papp. 7,5 KVA la résonance d'un nombre assez important d'harmoniques; tandis que sur le 25 KVA monophasé, nous ne sommes parvenus à aucun résultat intéressant.

21. Corollaire.

Nous constatons d'après ces diverses expériences que la résonance d'un harmonique lorsqu'elle est réalisable, nous permet de calculer la chute de tension dans un transformateur. La valeur de $L\omega$ déterminée par la méthode de résonance est confirmée par la méthode de Kapp.

La méthode de Kapp nécessite une réduction notable de la tension primaire du transformateur. La différence entre la tension normale et la tension de court-circuit, déjà assez grande pour des transformateurs de B. T., devient très appréciable pour des transformateurs de H. T. Dans les expériences qui précèdent, nous avons été amenés, pour réaliser le fonctionnement en court-circuit, à réduire d'environ dix-sept fois la tension normale pour le transformateur Gindre et

de cinquante-sept fois pour le transformateur triphasé de 7,5 KVA.

Au contraire, la méthode de résonance permet de déterminer la valeur de la réactance totale de $L\omega$ lorsque le transformateur fonctionne sous tension normale; l'utilisation de cette méthode doit, par suite, à notre avis, conduire à des valeurs plus exactes que la précédente.

CHAPITRE IV

Etude des transformateurs alimentés à tension non sinusoïdale

23° L'harmonique de denture.

Dans les études précédentes, pour toutes nos expériences, nous avons utilisé une tension pratiquement sinusoïdale, celle du réseau. Nous avons repris les mêmes essais en alimentant le transformateur par un alternateur dont la tension au lieu d'être sinusoïdale, présente une forme s'éloignant nettement de la sinusoïde, par suite de l'existence d'harmoniques assez importants, en particulier des harmoniques provenant de la denture.

Considérons, en effet, un alternateur à induit denté et soit n le nombre d'encoches par champ double, si la pièce polaire ne couvre pas un nombre exact de pas de dentures, la réluctance de l'entrefer varie avec la position de cette pièce polaire, le flux subit une ondulation périodique dont la période a pour valeur le temps nécessaire à l'inducteur pour passer d'un pas plein de denture à l'autre, c'est-à-dire 1/n. On peut dès lors représenter ce flux par l'équation :

$$\Phi = \Phi_0 \cos \omega t \, [1 + \lambda \cos (n \omega t - \varphi)]$$

où $\lambda = \frac{2 \pi}{T}$ étant la longueur développée sur l'induit d'un champ double.

L'équation précédente peut s'écrire en développant le second nombre :

$$\Phi = \Phi_0 \cos \omega t + \frac{\lambda \Phi_0}{2} \cos\left[(n-1)\omega t - \varphi\right] + \frac{\lambda \Phi_0}{2} \cos\left[(n+1)\omega t - \varphi\right]$$

La denture introduit donc dans le flux deux harmoniques de même amplitude et de même phase, l'un d'ordre (n — 1), l'autre d'ordre (n + 1). De son côté, la f, e, m, qui est la dérivée, comporte également deux harmoniques d'ordre (n — 1) et (n + 1), de phase φ et d'amplitude proportionnelle à $(n-1)\lambda\Phi_0$ et $(n+1)\lambda\Phi_0$.
c'est-à-dire, sensiblement égales, si n est assez grand.

L'alternateur que nous utilisons à l'alimentation du transformateur possède les caractristiques suivantes : Puissance = 19 KVA; tension : 210 volts; trois phases; nombre de pôles = quatre; nombre total d'encoches : vingt-quatre, soit par paire de pôles un nombre d'encoches égal à douze.

Les harmoniques de denture sont donc successivement d'ordre 11 et 13. Dans la courbe de tension (fig. 22 *a*) relevée à l'oscillographe cathodique, on note la présence de l'harmonique d'ordre 11; ainsi pour l'alternateur considéré, on peut dire que l'harmonique 11 prédomine vis à vis du 13.

Avec une telle alimentation, au primaire du transfromateur, la forme de la courbe du courant primaire varie avec la valeur de la capacité insérée au secondaire. A ces déformations de la courbe de courant correspond une variation du courant primaire, I_1, en fonction du courant secondaire, I_2, qui est tout à fait différente de celle qui est observée dans le cas d'une tension d'alimentation sinusoïdale.

Dans le cas actuel, nous allons voir que la courbe I_1 (I_2) ne présente plus une allure analogue à celle de la courbe de Mordey. L'influence des harmoniques de denture, reste prépondérante sur la variation des courants, primaire et secondaire et, pour étudier cette influence nous allons, comme dans le cas d'une tension sinusoïdale, reprendre nos expériences sur les mêmes transformateurs en les alimentant par l'alternateur dont les spécifications sont données ci-dessus. Nous tracerons la courbe $I_1(I_2)$ pour chaque transformateur

et nous signalerons dans nos tableaux les déformations importantes subies par la courbe du courant primaire avec la valeur de capacité insérée au secondaire.

24° **Essais sur le transformateur Gindre.**

Le montage restant le même que sur la figure 4, nous allons alimenter le transformateur par l'alternateur, sous des tensions de valeurs différentes.

Première série de mesures. — Les bobines primaires, en série, sont alimentées sous 220 volts, par la tension composée de l'alternateur.

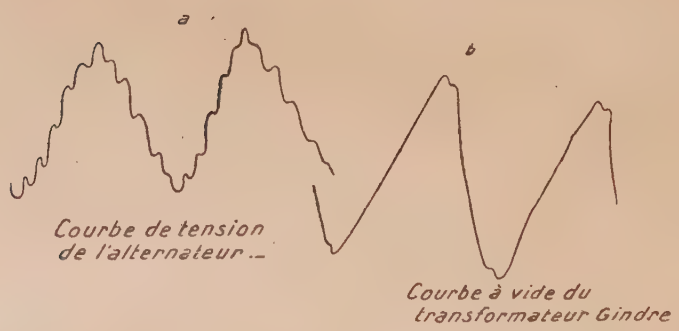


Fig. 22.

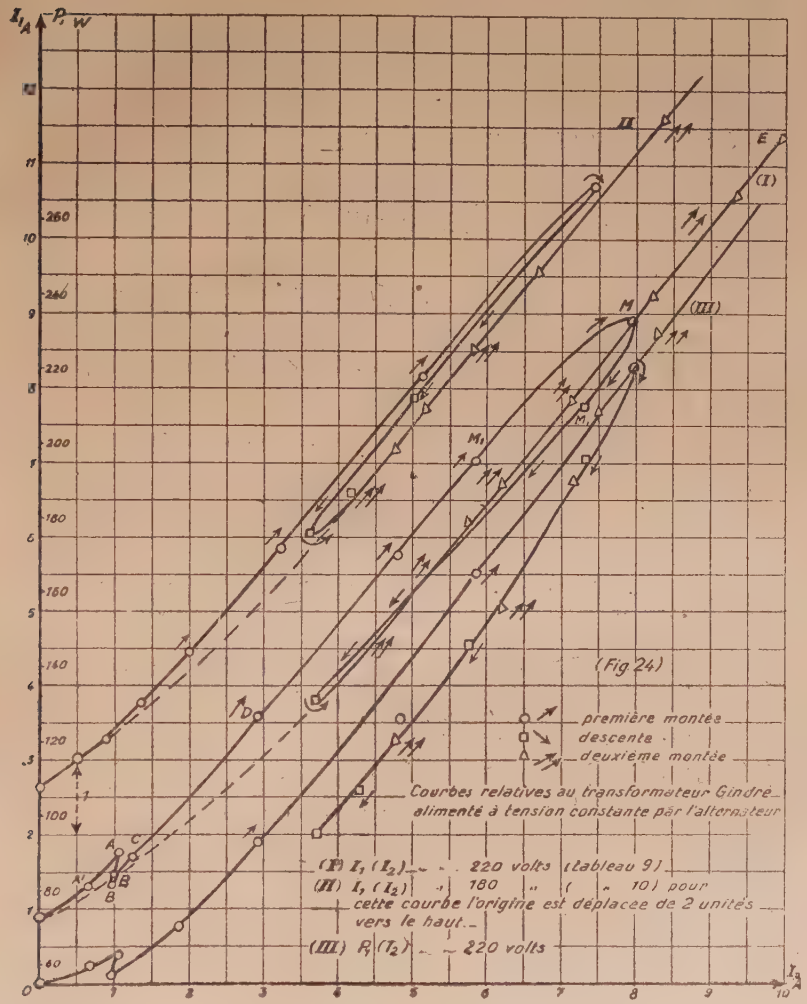
Fig. 23. — Les déformations subies par la courbe du courant primaire lorsque le transformateur Gindre est alimenté par l'alternateur.

TABLEAU 9 *Etude du transformateur Gindre alimenté à 220 volts par la tension composée de l'alternateur.*

RESULTATS

N° de la mesure	I_1 Ampères	I_2 Ampères	P_1 Watts	C Microfarads	I_1/I_2	OBSERVATION SUR LA FORME DE LA COURBE	FIG.	POINTS SUR LA COURBE
1	0,9	0	55	0	2,01	Courbe à vide	22 b	V
2	1,31	0,65	60	1,75	2,01	Harmonique d'ordre sup	fig. 23	A'
3	1,74	1,05	62,5	2,33	1,65			A
4	1,5	0,9	57,5	2,8	1,66	Résonnance de H23 en batt. avec H25	a	B
5	1,36	0,89	60	3,5	1,53			B'
6	1,7	1,25	65	4,66	1,36	H23 complètement transformé	b	C
7	2,27	1,85	70	5,75	1,23			
8	3,57	2,9	92,5	7	1,23	H13 en battement avec h. sup	c	D
9	5,75	4,8	125	8,75	1,2			
10	7	5,85	165	9,33	1,2			M_1
11	8,9	8	223	11,66	1,11	Harmonique de denture (11)	d	M
12	7,75	7,3	195	12,25	1,06			M_2
13	6,21	5,75	145	12,83	1,08	L'Harmonique de denture diminue d'amplitude		
14	4,5	4,5	106	14	1			
15	3,78	3,72	95	35	1,015	H de denture transformé	e	m
16	4,9	4,77	120	49	1,01	La courbe de courant se déforme encore pour prendre une forme définitive qui reste sensiblement la même dans toute la partie supérieure de la courbe		
17	6,17	6,2	155	63	1,08			
18	7,85	7,15	190	77	1,1			
19	9,25	8,25	230	91	1,12			
20	10,6	9,4	»	105	1,07	La courbe observée est semblable à la courbe de courant de l'alternateur alimentant un circuit uniquement résistant	f	E
21	11,4	9,95	»	112	1,14			
22	12,85	11,1	»	126	1,16			

Le tableau précédent nous permet de tracer la courbe $I_1(I_2)$, figure 24, courbe représentant les variations du courant primaire en fonction du courant secondaire.



La courbe ainsi tracée ne présente plus une forme analogue à celle de la courbe de Mordey : dans le cas actuel, à mesure qu'on fait croître la capacité au secondaire, la

courbe $I_1(I_2)$ monte, d'abord jusqu'à un maximum M, puis descend jusqu'à un minimum m pour remonter ensuite, de nouveau, formant ainsi une boucle dans sa partie supérieure; elle accuse, en outre, une sorte de pointe dans sa partie inférieure (fig. 24).

Le tableau 9 nous montre, par ailleurs, qu'il existe une correspondance entre les variations du courant et de la puissance absorbée par le primaire d'une part, et la forme de la courbe de courant d'autre part, et, qu'en outre, les singularités observées sur la courbe $I_1(I_2)$ (fig. 24) proviennent de certaines formes caractéristiques de la courbe du courant primaire I_1.

Pour préciser cette correspondance et expliquer l'origine de ces singularités, nous allons procéder à une analyse de la courbe $I_1(I_2)$ en la divisant à l'aide des points A, B, C, D, M, m, en sept parties essentielles, chaque partie étant à son tour subdivisée s'il est besoin :

1° Dans la partie VA, à mesure qu'on fait croître la capacité insérée au secondaire à partir de la marche à vide, on voit apparaître sur la courbe du courant les traces d'harmoniques d'ordre supérieur; on constate, en particulier, l'apparition de l'harmonique 29 pour une valeur de la capacité au secondaire égale à 1,1 microfarads.

2° Au voisinage du point A et plus particulièrement en ce point, on voit apparaître sur l'écran de l'oscillographe une image qui se rapproche de l'harmonique 23; l'image ainsi observée va en se perfectionnant à mesure qu'on va de A vers B pour prendre en B une forme qui consiste en une résonance de l'harmonique 23 en battement avec l'harmonique 25 (fig. 23 *a*).

3° Si l'on continue à faire croître la capacité, en d'autres termes si l'on parcourt la courbe $I_1(I_2)$ de B vers C tout en observant à l'oscillographe la forme de la courbe de courant relative au primaire du transformateur, on s'aperçoit que l'harmonique 23 disparaît peu à peu pour céder la place à un harmonique d'ordre inférieur et on constate sur la figure 23 *b*, qui correspond à une valeur de capacité donnant

le point C sur la courbe I_1 (I_2) l'affaiblissement de presque la moitié des amplitudes qui caractérisaient l'harmonique 23 en battement avec 25 (fig. 23 *a*).

4° Dans la partie CD, à mesure qu'on tend vers le point D, on voit apparaître sur l'écran une image qui se rapproche de l'un des harmoniques de denture, pour prendre en D la forme de la figure 23 *c* où l'on peut prévoir l'apparition prochaine de l'un des harmoniques de denture, le plus important, l'harmonique 11.

5° L'image ainsi obtenue continu à se transformer dans la partie DM à mesure qu'on tend de D vers M; au voisinage du point M, elle prend une forme caractéristique qui consiste en une résonance de l'harmonique 11, le plus important des deux harmoniques de denture, en battement avec l'harmonique 13, deuxième harmonique de denture (fig. 23 *d*) Le phénomène ainsi observé s'aperçoit un peu avant le point M et continue à persister un peu au delà de ce point; nous avons pu, dans toute la partie supérieure de la demi-boucle allant de M_1 à M_2 constater son existence.

En d'autres termes, l'apparition de cet harmonique, dans la mesure où il nous a été possible de faire varier la capacité, correspond à une valeur de la capacité au secondaire allant de 9,33 à 12,25 microfarads. Bien que l'écart entre ces capacités ne soit pas important, une faible variation de celle-ci apporte une variation notable dans la valeur du courant primaire.

6° Au delà du point M_2 l'harmonique de denture disparaît peu à peu au fur et à mesure qu'on s'éloigne de ce point, c'est-à-dire au fur et à mesure que l'on fait croître la capacité. Au point m, l'harmonique de denture est complètement transformé (fig. 23 *e*).

Contrairement à ce qui se passait dans la portion correspondant au point M, aux voisinages de m, pour une variation assez notable de la capacité, les valeurs des courants primaire et secondaire restent sensiblement les mêmes; en particulier, nous avons pu noter les valeurs suivantes :

I_1 ampères.	3,8	3,67	3,7	3,78
I_2 ampères.	3,72	3,5	3,6	3,72
C microfarads.	17,5	21	28	35

7° A partir du point m, la forme de la courbe du courant primaire subit d'autres transformations à mesure qu'on tend vers E. Aux environs et au delà de ce point, elle prend une forme (fig. 23 *f*) qui se rapproche de la courbe de courant de l'alternateur, lorsque ce dernier débite sur un circuit uniquement résistant (fig. 22 a). Cette dernière forme persiste sur une assez longue partie de la courbe $I_1(I_2)$, en quelque sorte dans toute la partie supérieure de cette courbe lors de sa deuxième montée; par suite, elle persiste pour une variation assez notable des capacités mises au secondaire du transformateur. Nous avons pu l'observer dans le cas de nos expériences, pour des valeurs de la capacité allant de (91) à (161) microfarads.

En résumé, au fur et à mesure qu'on fait croître la valeur de la capacité, au secondaire du transformateur, la courbe $I_1(I_2)$, partant du point V correspondant à la valeur à vide du courant primaire, commence à monter jusqu'à un point A assez voisin de V, puis descend jusqu'à un point B′ très voisin de A passant entre A et B′ par un point B au voisinage duquel on aperçoit sur l'écran de l'oscillographe l'apparition de l'harmonique 23 en battement avec l'harmonique 25. Elle remonte ensuite jusqu'à un maximum M à partir duquel elle redescend jusqu'à un minimum m et remonte de nouveau, presque en ligne droite.

Elle se trouve ainsi affectée de deux singularités : la première consiste en une pointe peu prononcée dans sa partie inférieure, la seconde en une boucle assez accentuée dans sa partie supérieure, la première pointe est due au passage des harmoniques d'ordre supérieur à l'harmonique 23, la seconde à l'apparition puis à la disparition progressives de l'harmonique de denture.

Dans une première approximation, nous pouvons faire disparaître la singularité inférieure en supprimant les points A et B′ pour lesquels les valeurs de la capacité restent respectivement très voisines de celles relatives aux points A′ et B; nous pouvons, en effet, lire sur le tableau la distribution suivante des valeurs de C :

POINTS	C MICROFARADS	DIFFÉRENCE	
A′	1,75	$C_A - C_{A'}$ = 0,58	microfarads.
A	2,33		
B	2,8	$C_B - C_A$ = 0,47	»
B′	3,5	$C_{B'} - C_B$ = 0,7	»
C	4,66	$C_B - C_{A'}$ = 1,05	»
		$C_C - C_B$ = 1,86	»
		$C_{A'} - C_V$ = 1,75	»

En mettant ainsi en évidence la variation de C dans cette partie de la courbe, nous constatons qu'en faisant passer la courbe par les points V, A′, B et C, la capacité varie d'un point à l'autre sensiblement du même ordre de grandeur; nous aurions ainsi supprimé la petite pointe en ayant toujours conservé le point le plus important de cette région de la courbe, à savoir le point B qui correspond à la valeur de la capacité donnant l'harmonique 23.

En ce qui concerne la boucle supérieure, sa largeur dépend du phénomène de saturation; nous allons voir qu'en alimentant le transformateur à des tensions inférieures à la tension nominale de 220 volts, cette boucle va se resserrer pour former presque une ligne.

En d'autres termes, si l'on s'éloignait nettement de la saturation, par suite de l'existence de l'harmonique de denture, la courbe monterait jusqu'en M, puis descendrait sur elle-même jusqu'en m pour remonter ensuite en empruntant le même tracé.

(1) *Remarque :* Nous avons construit sur le même graphique (fig. 24) la courbe donnant les variations de la puissance absorbée par le primaire en fonction du courant secondaire : nous constatons sur cette courbe que la résonance des harmoniques 23 et 11 produit des singularités analogues à celles rencontrées sur la courbe (I_1 I_2) pour les mêmes harmoniques.

Deuxième série de mesures. — Nous allons, afin de mettre en évidence l'effet de la saturation, sur la forme de la boucle de la partie supérieure de la courbe I_1 (I_2) reprendre nos expériences en alimentant le même transformateur sous une tension réduite de 180 volts.

TABLEAU 10

Etude du transformateur Gindre alimenté sous une tension réduite par l'alternateur.

RESULTATS $V_1 = 180$ volts.

N° de la mesure	C Microfarads	I_1 Ampères	I_2 Ampères	I_1 / I_2
1	0	0,66	0	»
2	1,55	1,06	0,5	2,12
3	2,33	1,5	0,9	1,665
4	3,5	1,24	0,85	1,46
5	4,66	1,76	1,29	1.365
6	5,75	2,44	2	1,23
7	7	3,85	3,2	1,2
8	8,75	6,1	5,15	1,165
9	10,5	8,7	7,45	1,17
10	14	5,85	5	1,17
11	17,5	4,6	4,15	1,12
12	21	4,1	3,6	1,17
13	56	5,2	4,8	1,085
14	63	5,75	5,15	1,115
15	77	6,55	6,8	1,11
16	91	7,55	6,7	1,16
17	105	8,5	7,4	1,15
18	112	9.6	8,35	1,15
19	119	10,2	8,85	1.15

Dans le tableau 10 précédent, nous n'avons pas indiqué les variations de forme que subit la courbe de courant. Ces variations restent identiques à celles observées lors de l'essai précédent lorsque le transformateur est alimenté à 220 volts. On constate, en effet, au fur et à mesure qu'on fait croître la valeur de la capacité au secondaire du transformateur, qu'il apparaît sur l'écran de l'oscillographe, placé dans le circuit primaire (fig. 4), d'abord la courbe à vide, sur laquelle viennent se greffer ensuite des traces d'harmonique

d'ordre supérieur (en particulier l'harmonique 29 pour la même valeur de capacité que dans le cas précédent), puis l'harmonique 23 qui, après avoir subi plusieurs déformations cède la place à l'harmonique 11, lui-même va disparaître à son tour pour se transformer complètement et l'on retrouve à la fin la forme de la figure 23 *f*. Nous remarquons d'ailleurs que les transformations de la courbe du courant produisent le même effet sur les variations de la valeur de ce courant et que de plus, elles se reproduisent dans le cas actuel pour des valeurs de la capacité sensiblement égales à celles utilisées dans le cas précédent.

Notre but est ici surtout d'analyser la forme de la boucle produite sous le double effet de la saturation et de l'harmonique de denture, dans la partie supérieure de la courbe $I_1(I_2)$. En traçant cette courbe d'après le tableau 10, nous remarquons (fig. 24 II) que les points correspondant à la première montée de la courbe (○) jusqu'en M, ceux correspondant à la descente (□) jusqu'en m et, enfin, ceux qui correspondent à la seconde montée (Δ) se trouvent presque en ligne droite.

Ainsi en faisant abstraction de la petite pointe provoquée dans la partie inférieure de la courbe par le passage des harmoniques d'ordre supérieur à l'harmonique 23 et en négligeant l'effet de l'harmonique de denture et de la saturation, nous pourrions conclure que la courbe présente une légère courbure dans sa partie inférieure puis monte d'un seul trait en ligne droite (fig. 24). Cette forme linéaire de la courbe est d'ailleurs justifiée par le rapport I_1/I_2, porté sur le tableau 10, qui reste sensiblement constant à partir d'un courant de l'ordre de trois ampères.

25° Essais sur un transformateur de haute tension.

Nous allons reprendre nos expériences sur le transformateur triphasé de 7,5 KVA que nous avons décrit lors de nos essais en tension sinusoïdale (Chap. II, fig. 12). Il sera alimenté du côté H. T. par le transformateur triphasé de puissance 25 KVA, lui-même alimenté par l'alternateur, du côté B. T. La tension est réglée de façon à avoir 12.000 volts au primaire du transformateur à étudier, la tension nominale de celui-ci étant de 13.200 volts.

La courbe de courant dans le cas actuel, comme le montre le tableau 11, subit les mêmes déformations que dans le cas du transformateur Gindre; il en résulte par ailleurs l'existence des mêmes singularités sur la courbe $I_1(I_2)$. Cette dernière tracée en déduisant du tableau 11 les valeurs de I_1 et celles de I_2, présente, en effet, dans sa partie supérieure une boucle qui est due à l'apparition puis à la disparition progressives de l'harmonique de denture.

Dans sa partie inférieure, cette courbe possède également la singularité particulière due à l'harmonique 23. Nous n'insistons pas sur ces points et nous cherchons à donner à cette courbe une forme continue en essayant de supprimer la boucle supérieure.

Nous constatons sur le tableau 11, en lisant les valeurs de I_1/I_2, que ce rapport présente une valeur qui reste sensiblement la même au commencement et à la fin de la colonne. Au milieu, c'est-à-dire à partir du moment où l'harmonique de denture commence à apparaître (C) et jusqu'à sa disparition complète (m), le rapport I_1/I_2, tout en restant sensiblement constant, présente une valeur différente de celle correspondant au début et à la fin.

La courbe $I_1(I_2)$ (fig. 26) pourrait alors passer d'une façon continue par les points V, A, m, E, et croître d'une façon sensiblement linéaire à partir du point A', si l'on écartait l'effet de la saturation et la singularité due à la résonance de l'harmonique de denture. Elle aurait ainsi, comme dans les autres cas, la forme d'une demi-courbe de Mordey.

TABLEAU 11

Etude d'un transformateur triphasé à haute tension : v_1 = 13.200 volts. Puissance apparente = 7,5 KVA.

RESULTATS

N° de la mesure	I_1 m. a.	I_2 Ampères	P_1 Watts	C Microfarads	I_1 I_2	OBSERVATION SUR LA COURBE DE COURANT	Fig. 25	POINTS SUR LA COURBE
1	29,5	0	»	0	1,67	Courbe à vide	a	V
2	42,5	2,54	»	14	1,67	Résonnance de H23	b	A
3	62,5	4,32	»	28	1,45			A'
4	86,5	6	»	35	1,44			
5	127,5	8,25	»	42	1,54	H11 avec traces de H13	c	B
6	178,5	12,3	»	49	1,45	Apparition de l'harmonique de denture qui		
7	250	15,3	»	56	1,63	va en s'améliorant		C
8	257,5	15,7	»	61	1,64			
9	275	16,3	»	64	1,685	H de denture amélioré	d	M
10	236	14,2	»	69	1,66			
11	208,7	12,5	»	76	1,67	L'harmonique de denture disparaît peu à		
12	181	11	»	83	1,64	peu pour être complètement trans-		
13	162	10	»	91	1,62	formé		
14	123,5	9,4	»	168	1,315		e	m
15	139	10,4	»	197	1,335			
16	155	11,3	»	218	1,37			
17	185	13,25	»	281	1,395			
18	211,7	14,9	»	344	1,42			
19	236	16,2	»	386	1,455	La forme finale	f	E
20	266	18,5	»	471	1,44			

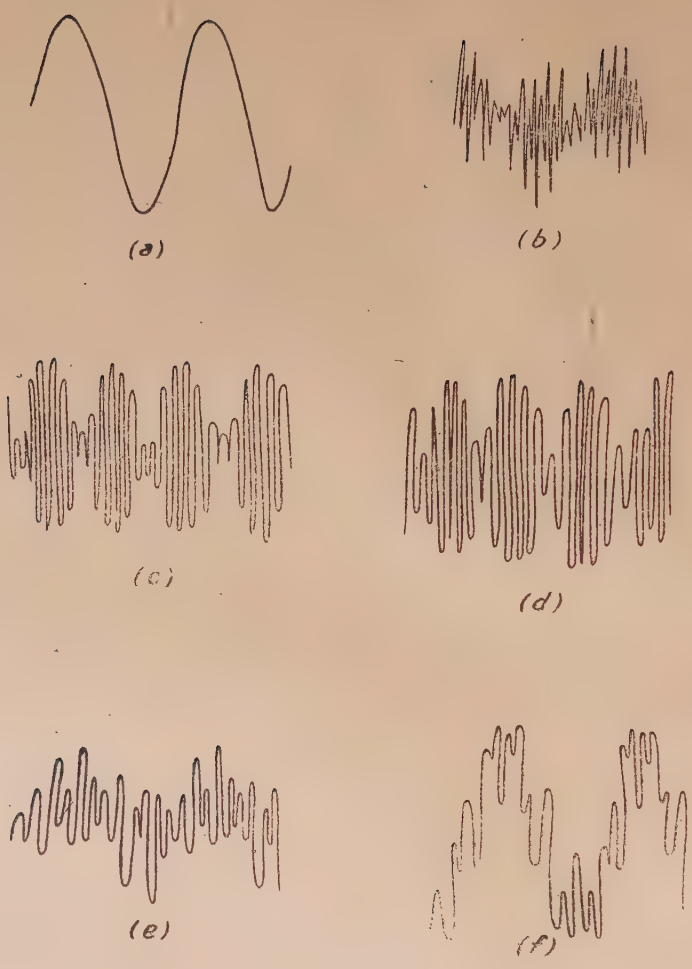


Fig. 25 — Transformations subies par le courant primaire lorsque le transformateur triphasé 7,5 k. v. a. est alimenté par l'alternateur.

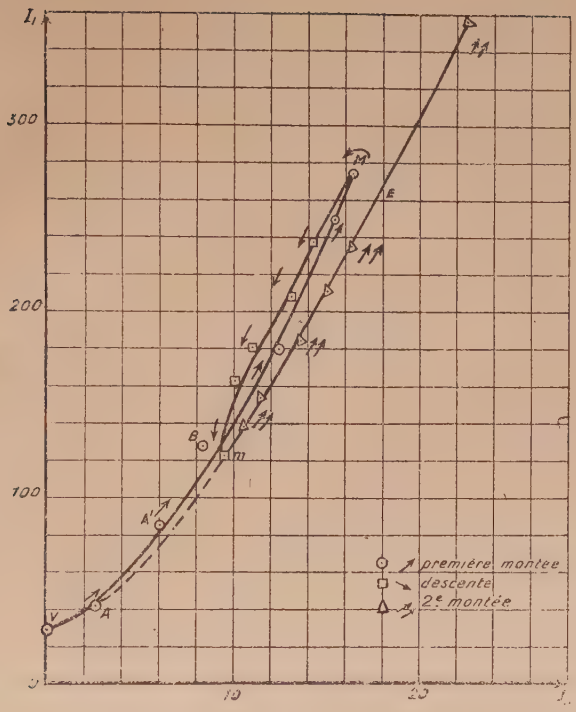


Fig. 26. — Courbe I_1 (I_2) relative au transformateur triphasé de 7,5 k. v. a. alimenté par l'alternateur.

I_1 en milliampères.

I_2 en ampères.

Conclusion

Dans les conditions de nos expériences, le fonctionnement des transformateurs sur des capacités insérées au secondaire conduit à des résultats très différents suivant que la tension d'alimentation est sinusoïdale ou non.

Dans le cas d'une tension sinusoïdale, la variation du courant primaire, en fonction du courant secondaire, déduite de l'étude expérimentale, est conforme à la loi théorique donnée par le diagramme : le courant primaire décroît à partir de sa valeur à vide jusqu'à un minimum, pour croître ensuite. La courbe $I_1(I_2)$ a dans ce cas une forme analogue à celle d'une courbe de Mordey rencontrée dans l'étude des moteurs synchrones.

Nous constatons par ailleurs, au cours de nos expériences, en restant toujours dans le cas d'une tension d'alimentation sinusoïdale, que la puissance absorbée par le primaire du transformateur reste sensiblement constante au début, puis croît légèrement à partir d'une certaine valeur de capacité correspondant sensiblement au minimum du courant primaire. Lorsque nous modifions la valeur de cette puissance pour des valeurs croissante de celle-ci, nous obtenons une série de courbes $I_1(I_2)$ qui vont en s'applatissant, tandis que le minimum du courant primaire se déplace vers le haut et à droite; les courbes obtenues ont la même disposition que les courbes de Mordey d'un moteur synchrone, lorsque pour diverses puissances, on fait varier l'excitation.

Rappelons également qu'en alimentant un même transformateur sous tension sinusoïdale déterminée, lorsqu'on fait varier le rapport de transformation, on obtient une série de courbes qui passent par un même point et ont leur minimum sur une même horizontale; en effet, dans ce cas, le courant à vide et la puissance absorbée au primaire pour des capacités de faibles valeur restent les mêmes. Ces courbes vont en s'applatissant à mesure que k croît, puisque pour une même valeur de I_1, I_2 est d'autant plus grand que k est plus grand.

En ce qui concerne le facteur de puissance relatif au minimum du courant primaire, il doit être théoriquement égal à un. Dans les conditions de nos expériences, nous obtenons des valeurs différentes qui dépendent d'ailleurs du type et du genre de transformateur. Les divergences constatées proviennent des causes suivantes :

1° La déformation de la courbe du courant primaire dûe à la présence de capacités au secondaire entraîne des erreurs dans la mesure directe des courants primaire et secondaire; de ce fait, lorsque nous calculons le facteur de puissance par la formule $\cos. \varphi = \frac{P_1}{V_1 P_1}$ la valeur de I_1, déduite de la mesure, introduit une erreur dans le calcul de cos. φ. Cette erreur se trouve diminuée lorsque nous déterminons cos. φ par le procédé de diagramme déduit de la relation $I_1 + I_2/k = I_0$ où n'interviennent que des valeurs relatives des courants;

2° Nos essais sur un transformateur de puissance apparente de 25 KVA, nous ont montré que la saturation éloigne le facteur de puissance de sa valeur réelle : la valeur du cos. φ correspondant au minimum, est d'autant plus faible que le transformateur est plus saturé;

3° Dans le cas des transformateurs à H. T. un autre élément entre en jeu pour écarter le facteur de puissance de sa valeur réelle; il réside dans l'introduction des transformateurs de mesure. M. A. Azim a vérifié, ainsi qu'il est connu, que les appareils enregistrent des valeurs différentes

pour le courant et la puissance suivant que l'on utilise ou non des transformateurs de mesure.

Nos expériences sur un transformateur triphasé à H. T. nous fournissent pour le facteur de puissance, relatif au minimum, et calculé de deux manières différentes les valeurs suivantes :

$$\cos \varphi_c = \frac{P_1}{V_1 I_1 \sqrt{3}} = 1,1$$

$$\cos \varphi \frac{P_1}{P_3} = 1$$

déduit de la formule

$$\operatorname{tg} \varphi \frac{P_1}{P_3} = \sqrt{3} \frac{P_1 - P_3}{P_1 + P_3}$$

où n'interviennent que les valeurs de la puissance aborbée par le primaire mesurées par la méthode de deux wattmètres.

Par contre, lorsque la tension d'alimentation n'est plus sinusoïdale, la courbe $I_1(I_2)$ représentant la variation du courant primaire en fonction du courant secondaire n'a plus une forme analogue à celle d'une courbe de Mordey. Les observations oscillographiques nous ont montré que la courbe de courant subit des déformations plus accentuées que dans le cas précédent et que l'influence des harmoniques est prépondérante; il existe une relation étroite entre les déformations subies par la courbe du courant primaire d'une part et la variation de la valeur du courant primaire, en fonction du courant secondaire, d'autre part. La courbe $I_1(I_2)$ présente deux singularités : la première sous forme d'une pointe dans sa partie inférieure due à l'apparition puis à la disparition de l'harmonique 23 en battement avec l'harmonique 25; la seconde sous forme d'une boucle dans sa partie supérieure; cette deuxième singularité étant due à l'apparition progressive puis à la disparition de l'harmonique de denture; la largeur de la boucle dépend de la saturation; elle est plus serrée pour un transformateur moins saturé. La résonance pure de l'harmonique de denture se manifeste dans une région qui entoure le sommet de la bou-

cle, et pour laquelle une afible variation de capacité introduit une variation notable dans la valeur du courant primaire. Par contre, dans la partie inférieure de la boucle où l'harmonique de denture est complètement transformé, pour une variation assez notable de la capacité, les valeurs des courants primaire et secondaire restent sensiblement les mêmes. A partir du point le plus bas de la boucle, la courbe $I_1(I_2)$ monte d'une façon sensiblement linéaire et sur cette partie de la courbe, à partir d'un point, dont l'ordonnée est un peu supérieure à celle du sommet de la boucle, la courbe du courant prend une forme analogue à celle correspondant au cas où l'alternateur alimente un circuit uniquement résistant

Cependant, en faisant abstraction de la petite pointe inférieure et en négligeant l'effet de l'harmonique de denture et de la saturation, nous pourrions dire que la courbe $I_1(I_2)$ partant de l'origine présente une légère courbure dans sa partie inférieure puis monte ensuite sensiblement en ligne droite; avec ces simplifications, elle aurait ainsi une forme analogue à celle d'une demi-courbe de Mordey. La forme linéaire de la courbe est d'ailleurs justifiée par le rapport I_1/I_2 qui reste sensiblement constant à partir d'un point situé un peu au-dessus de l'origine.

Notons que, dans le cas de l'alimentation du primaire par une tension non sinusoïdale, la courbe représentant la variation de la puissance absorbée par le primaire en fonction du courant secondaire, présente des singularités analogues à celles rencontrées sur la courbe $I_1(I_2)$.

D'après cette analyse, on peut dire que, dans le cas d'une tension d'alimentation sinusoïdale, tandis que les déformations affectant la courbe du courant introduisent une certaine erreur dans la mesure de ces courants, la loi de variation du courant primaire n'est en aucune façon modifiée. Par contre, lorsque la tension d'alimentation cesse d'être sinusoïdale, il existe une étroite relation entre les déformations présentées par la courbe du courant primaire et la variation des valeurs de ce courant en fonction des valeurs du courant secondaire, en un mot, la loi de variation du courant primaire cesse d'exister.

Nous avons constaté, au cours de nos expériences, que la présence de capacités dans le circuit secondaire d'un transformateur déforme la courbe du courant primaire. Pour des valeurs appropriées de la capacité placée au secondaire, nous sommes parvenus à obtenir la résonance d'un certain nombre d'harmoniques du courant primaire.

Le phénomène de résonance apparaît mieux sur des transformateurs de faible puissance et, ceci provient du fait que dans ces appareils l'inductance présente une valeur suffisante pour réaliser la résonance. Mais lorsque la puissance du transformateur dépasse une certaine valeur, d'ailleurs assez faible, il devient difficile de réaliser la résonance d'un harmonique quelconque; c'est là une conséquence de la faible valeur de l'inductance de tels appareils.

D'autre part, la résonance des harmoniques, lorsqu'elle est réalisable, permet de déterminer la réactance totale du transformateur et conduit à une méthode susceptible de donner la chute de tension du trasnformateur. Cette méthode se trouve confirmée par celle de Kapp.

Il est à noter que la détermination de L_ω avec la méthode de Kapp est réalisée à tension réduite, tandis que la méthode de résonance présente l'avantage d'obtenir la réactance et par suite la chute de tension à partir du fonctionnement d'un transformateur alimenté sous tension normale.

Bibliographie

Bunet P. — Les transformateurs.

Bunet P. — Le groupement en étoile des transformateurs et les harmoniques 3 du point neutre (*Bull. S. F. E.*, septembre 1935). *Discussion* (mars 1936).

Boucherot et Fallou. — Prédétermination des surtensions par des harmoniques de saturation des transformateurs (*R. G. E.*, 31 mai 1924).

Boyajian A. — Division de la réactance en réactance primaire et secondaire (*Journal A. I. E. E.*, août 1925).

Curchod. — Electrotechnique et magnétisme.

Calmiche Ch. — Note sur la réactance de fuites des transformateurs (*Bull. S. F. E.*, septembre 1934. *Discussion*, novembre 1934).

Clem J. F. — Formule exacte pour la détermination des chutes de tension dans le transformateur (*E. L. E.*, mai 1936).

Dzung L. S. et Durght H. B. — Formules des réactances (*Electrical Engineiring*, novembre 1937).

Daviend G. — Sur le choix des valeurs de l'induction magnétique et de la densité du courant dans les transformateurs (*R. G. E.*, 30 octobre 1924).

Damien. — Surtensions produites par l'harmonique 3 et ses multiples dans les transformateurs triphasés (*R. G. E.*, 8 septembre 1917).

Girault P. — Calcul des réactances de fuite dans un transformateur (*Bull. de la S. F. E.*, novembre 1934).

Hemsley H. Sydney. — Compensation harmonique du courant à vide dans les transformateus desservant des lignes de transmission ou de distribution d'énergie (*B. E. A. M. A. Journal*, août 1938).

Hueter E. — Transformateurs utilisés comme générateurs d'harmoniques (*E. T. Z.*, 3 août 1933).

Hueter E. et R. Buch. — Transformateurs à courant magnétisant sensiblement sinusoïdal (*E. T. Z.*, 22 août 1935)

Jerphagnon E. — Calcul rapide de la tension en court-circuit (*R. G. E.*, 31 mai 1924).

Kraemer W. — Compensation des harmoniques engendrés par un transformateur (*Cong. Int. d'Electricité*).

Kuehn M. K. — Harmoniques engendrés par un transformateur (Conférence Internationale des Grands réseaux électriques à haute tension, n° 116, 24 juin-2 juillet).

Kubler J. — La construction des transformateurs chez Brown Boveri et Compagnie à Baden (*Rev. B. B. C.*, nov.-décembre 1942).

Pistoye De. — Sur l'harmonique 3 des transformateurs triphasés (*R. G. E.*, avril et juin 1941).

Papin Maurice. — Sur la formule donnant la chute de tension d'un transformateur sous un facteur de puissance déterminé (*R. G. E.*, 3 août 1929).

Papin M. D. — Précaution à prendre pour la mesure du rapport de transformation à vide.

Papin M. — Etude sur le fonctionnement en court-circuit (chute inductive, effort, pertes, parasites) (*R. G. E.*, mai 1925).

Mathieu M. — Les formules pratiques pour le transformateur (*La pratique des industries mécaniques*, mai 1924).

Stein G. — Sur les harmoniques supérieurs dans les courants magnétisants des transformateurs triphasés (*E. T. Z.*, 24 juillet 1930).

Swingedaw. — Résonance des harmoniques des transformateurs à courant triphasés (*Lum. électrique*, mars 1914).

Swingedaw. — Résonance des harmoniques 3 engendrés par l'hystérésis et la saturation du fer dans les transformateurs (*R. G. E.*, septembre 1920-janvier 1921).

Vaite R. — Influence de l'amplitude des harmoniques dans les transformateurs de mesure (*R. G. E.*, septembre 1941)

Van Castel A. — Détermination de surtension prenant naissance dans un transformateur triphasé lors de la mise sous tension du primaire, le secondaire ouvert (*Rev. Brown Boveri*, septembre 1934).

Waldvogel P. — Considérations sur les harmoniques du courant magnétisant des transformateurs dans le réseau triphasés étendus (*Rev. B. B. C.*, juillet 1939).

DEUXIÈME THÈSE

Propositions données par la Faculté

ETUDE DE LA DISTORSION DANS LES POSTES RÉCEPTEURS

VU ET APPROUVÉ :
Le Doyen
de la Faculté des Sciences
G. DUPOUY.

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :
Toulouse, le 11 juillet 1947
Le Recteur
Président du Conseil
de l'Université
P. DOTTIN.